

**ALMA MATER STUDIORUM-UNIVERSITA'  
DI BOLOGNA  
SEDE DI CESENA  
SECONDA FACOLTA' DI INGEGNERIA CON SEDE A CESENA**

**CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN  
INGEGNERIA ELETTRONICA E DELLE  
TELECOMUNICAZIONI**

---

TITOLO DELL'ELABORATO

**STUDIO DELLA PIANIFICAZIONE DI  
SISTEMI INTERLEAVED DAS MIMO  
IN AMBIENTE INDOOR**

TESI IN  
**PROPAGAZIONE E PIANIFICAZIONE NEI SISTEMI D'AREA LS**

Relatore:

Prof. Ing. V. DEGLI ESPOSTI

Scritta da:

FIASCHI STEFANO

Co-Relatore:

Ing. E. VITUCCI

Sessione I

Anno Accademico 2011/2012



## Indice

- Ringraziamenti
- Introduzione 1
- **Capitolo 1** Generalità sulle tecniche di trasmissione MIMO 3
  - 1.1 Che cos'è il MIMO 3
  - 1.2 Il canale MIMO 4
  - 1.3 Caratteristiche dei sistemi MIMO 6
    - 1.3.1 Diversity 6
    - 1.3.2 Beamforming 7
    - 1.3.3 Spatial Multiplexing 8
    - 1.3.4 Trade off MIMO 8
  - 1.4 Capacità del canale MIMO 9
    - 1.4.1 Condition Number 10
    - 1.4.2 Correlazione Spaziale 11
    - 1.4.3 Sistemi MIMO in cross-polarizzazione 11
  - 1.5 Propagazione indoor 12
    - 1.5.1 Normative sulle emissioni dei sistemi indoor 13
- **Capitolo 2** Lo standard LTE nei sistemi MIMO 15
  - 2.1 Frequenze e potenze dello standard LTE 17
  - 2.2 Interfaccia radio 18
    - 2.2.1 Composizione del segnale OFDM 19
    - 2.2.2 Interferenza Intersimbolica 20
    - 2.2.3 Generazione del segnale 20
    - 2.2.4 Struttura della frame LTE 21

•	<b>Capitolo 3</b> Tecniche DAS	23
▪	3.1 Estensione dei sistemi DAS alle tecniche di trasmissione MIMO	26
•	<b>Capitolo 4</b> Valutazione delle prestazioni di un sistema I-DAS MIMO 2x2	31
▪	4.1 Ambiente di riferimento e ray tracing	31
▪	4.2 Parametri delle simulazioni LTE	33
▪	4.3 Risultati ottenuti	34
▪	4.4 Osservazione sul funzionamento dei rami	36
▪	4.5 Simulazioni LTE atte alla valutazione del throughput in funzione dello sbilanciamento dei rami	38
-	4.5.1 Specifiche di simulazione	39
-	4.5.1.1 modello di canale	39
-	4.5.1.2 Sbilanciamento matrici di canale	40
-	4.5.1.3 Parametri di simulazione	41
-	4.5.2 Simulazioni effettuate	42
-	4.5.2.1 MIMO 2x2 1 ramo sbilanciato	42
-	4.5.2.2 MIMO 4x4 1 ramo sbilanciato	44
-	4.5.2.3 MIMO 4x4 2 ramo sbilanciato	46
-	4.5.2.4 MIMO 4x3 1 ramo sbilanciato	47
-	4.5.2.2 MIMO 4x3 2 ramo sbilanciato	49
•	<b>Capitolo 5</b> Planning di I-DAS MIMO di ordine qualsiasi	51
▪	5.1 Caso Lineare	51
-	5.1.1 Pianificazione	51
-	5.1.2 Profili di rapporto segnale rumore	53
-	5.1.3 Power Imbalance	55

- 5.1.4 Osservazione sul funzionamento dei rami	57
- 5.1.5 Valutazioni sul numero medio di rami utili e inutili	63
- 5.1.6 Valutazioni sulla distanza	65
▪ 5.2 Caso Bidimensionale	65
- 5.2.1 Interleaved DAS MIMO 2 rami	65
- 5.2.1.1 Pianificazione	67
- 5.2.1.2 Superficie di rapporto segnale rumore	68
- 5.2.1.3 Power Imbalance	68
- 5.2.1.4 Grafici di copertura riferiti ai rami utili	70
- 5.2.1.5 Valutazione sul numero medio di rami utili e inutili	73
- 5.2.2 i-MIMO DAS 4-9-16 rami	76
- 5.2.2.1 Pianificazione	76
- 5.2.2.2 i-MIMO DAS 4 rami	77
- 5.2.2.2.1 Superficie di rapporto segnale rumore	77
- 5.2.2.2.2 Grafici di copertura rami utili	78
- 5.2.2.3.3 Valutazione sul numero medio di rami utili e inutili	82
- 5.2.2.3.4 Valutazioni sulla distanza	83
- 5.2.2.3 i-MIMO DAS 9 rami	86
- 5.2.2.2.1 Superficie di rapporto segnale rumore	86
- 5.2.2.2.2 Grafici di copertura rami utili	86
- 5.2.2.3.3 Valutazione sul numero medio di rami utili e inutili	89
- 5.2.2.4 i-MIMO DAS 16 rami	91
- 5.2.2.4.1 Superficie di rapporto segnale rumore	91
- 5.2.2.4.2 Grafici di copertura rami utili	91

- 5.2.2.4.3 Valutazione sul numero medio di rami utili e inutili	95
-5.2.3 i-DAS MIMO 8 rami	95
- 5.2.3.1 Pianificazione	97
- 5.2.3.2 Superfici di rapporto segnale rumore	99
- 5.2.3.3 Grafici di copertura rami utili	102
▪ 5.3 Cenno al caso tridimensionale	106
- 5.3.1 i-DAS MIMO 4 rami	106
- 5.3.1.1 Pianificazione	106
- 5.3.1.2 Superfici di rapporto segnale rumore	108
- 5.3.1.3 Grafici di copertura rami utili	111
- 5.3.1.4 Valutazione sul numero medio di rami utili e inutili	115
• Conclusioni	119
• Riferimenti	121

## **Ringraziamenti**

Desidero innanzitutto ringraziare il Professore Vittorio Degli Esposti per le numerose ore dedicate alla mia tesi, per aver sempre risposto in maniera rapida e attenta a qualsiasi domanda e per avermi dato fiducia. Inoltre, ringrazio il corelatore Enrico Vitucci e il professor Franco Fuschini per la loro disponibilità a dirimere i miei dubbi durante la stesura di questo lavoro.

Desidero ringraziare con affetto i miei genitori Daniele e Verdiana per il sostegno ed il grande aiuto economico e morale che mi hanno dato ed in particolare per essermi stati vicino ogni momento durante questi anni di studio.

Un grazie speciale a tutti i miei amici conosciuti in ambito universitario per aver condiviso insieme questo percorso.

Desidero inoltre ringraziare tutti gli amici che mi hanno seguito, da vicino e da lontano, durante l'intero corso di studi. Li ringrazio per essermi stati vicino, perchè mi conoscono e mi accettano per quello che sono.

Un ringraziamento particolare alla mia ragazza Agnese che è sempre stata presente nei momenti felici e soprattutto in quelli più difficili.



## Introduzione

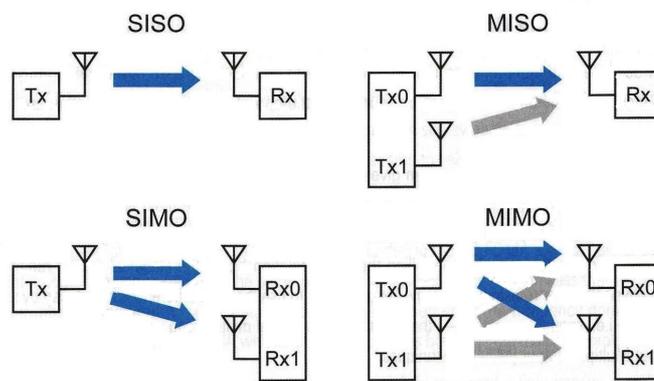
La recente introduzione della tecnologia MIMO (Multiple Input Multiple Output) in molti standard di comunicazione ha dato la possibilità, da parte dell'operatore di rete, di fornire data rate maggiori e una migliore BER (Bit Error Rate). Questi benefici fanno sì che l'utente possa usufruire di un servizio migliore. La principale caratteristica della tecnologia MIMO, è la possibilità di sfruttare a proprio vantaggio la propagazione multi-cammino, che invece nei sistemi tradizionali viene vista come un ostacolo per le prestazioni dei collegamenti radio. Il MIMO è quindi un buon candidato per migliorare le prestazioni dei collegamenti radio a banda larga in ambienti di propagazione affetti da cammini multipli. In particolare, gli standard cellulari di nuova generazione, come LTE (Long Term Evolution) e LTE-Advanced fanno uso di schemi di trasmissione MIMO per migliorare le prestazioni e raggiungere elevate velocità di trasmissione dati, sfruttando il guadagno in diversità e il multiplexing caratteristici della tecnologia MIMO. Negli scenari indoor tuttavia, alte prestazioni sono difficilmente raggiungibili a causa dell'insufficiente livello di rapporti segnale rumore sperimentato dagli utenti mobili all'interno dell'area di servizio. Per queste ragioni viene utilizzata la tecnologia DAS (Distributed Antenna Systems) che permette di estendere e di migliorare la copertura fornita all'utente, grazie alla quale si possono sfruttare le potenzialità dei sistemi MIMO. La combinazione delle due tecnologie, MIMO e DAS in ambienti indoor, apre la strada ad una varietà di soluzioni di pianificazione che sfruttano la possibilità di distribuire

opportunamente nello spazio le Remote Antenna Units (RAU) . In precedenti studi, è stato dimostrato che una soluzione efficiente e non eccessivamente costosa per il deployment di un sistema MIMO DAS è la cosiddetta tecnica “interleaved-MIMO DAS” (i-MIMO DAS) : in base a tale tecnica, per garantire una buona performance le antenne delle diverse RAU devono essere disposte nello spazio in maniera “interleaved”, cioè il più possibile interlacciate fra loro. In pratica, in un sistema interleaved-MIMO DAS gli elementi degli arrays di antenne in trasmissione devono essere distanziati sufficientemente in modo da sperimentare condizioni di propagazione diverse, ma ancora abbastanza vicini da consentire una sensibile sovrapposizione delle zone di copertura, in modo da poter utilizzare tutti i segnali provenienti dai diversi rami del sistema MIMO. Lo studio di questa tesi è incentrato sulla pianificazione e disposizione delle antenne remote di sistemi interleaved-MIMO DAS di diversi ordini. In particolare, nel capitolo 1 viene riportata una breve spiegazione teorica della tecnologia MIMO, nel capitolo 2 è presentato lo standard LTE che regola le comunicazioni wireless di cui fanno parte i sistemi MIMO, nel capitolo 3 una descrizione della tecnologia DAS. Nel capitolo 4 si effettua l'analisi delle prestazioni di sistemi interleaved-MIMO DAS 2x2 e 4x4, avvalendosi di simulazioni di sistema LTE, utilizzando un simulatore sviluppato dall'Università Tecnica di Vienna. Il capitolo 5 contiene tutta la parte di pianificazione dei sistemi i-MIMO DAS, a partire dal caso lineare fino ad arrivare a quello tridimensionale. Infine si sono tratte le conclusioni sullo studio di pianificazione eseguito.

# Capitolo 1 Generalità sulle tecniche di trasmissione MIMO

## 1.1 Che cos'è il MIMO [1]

La sigla MIMO è l'acronimo di multiple input multiple output, tale termine indica un sistema dove sono presenti più segnali di ingresso e più segnali di uscita. Nelle sistemi wireless il MIMO è inteso come un sistema che utilizza arrays di antenne multiple in trasmissione e in ricezione. Nei sistemi MIMO, le relazioni fra i segnali di ingresso e di uscita sono rappresentate dalla “matrice di canale”. Il canale radio comprende l'ambiente di propagazione, le antenne e il circuito di elaborazione connesso ad esse. Il MIMO è una tecnica di comunicazione che utilizza più antenne sia in ricezione che in trasmissione, tale molteplicità di antenne porta a un aumento della complessità del sistema che necessita più circuiti di elaborazione dei segnali. In figura 1.1 sono riportati i vari tipi di collegamenti che è possibile implementare, compreso il sistema MIMO.



**figura 1.1**

dalla figura è possibile notare che per il sistema MIMO ogni antenna Rx riceve i segnali trasmessi da parte di ogni antenna Tx, in questo modo, il canale di comunicazione può essere rappresentato da una

matrice  $N_R \times N_T$  (con  $N_R$  numero di antenne in Rx e  $N_T$  numero di antenne in Tx); dove gli elementi della matrice corrispondono alla risposta impulsiva dell'equivalente passabasso per ogni combinazione di antenne Tx-Rx.

## 1.2 Il canale MIMO

Scriviamo la relazione di ingresso uscita per un sistema SISO

$$y(t) = h(t) * x(t) + n(t)$$

dove  $y(t), x(t)$  e  $n(t)$  sono una realizzazione di un processo aleatorio che rappresentano rispettivamente il segnale ricevuto, il segnale trasmesso ed il rumore; se fissiamo un istante di campionamento  $kt$  la relazione di ingresso uscita è data dalla

$$y_k = h_k x_k + n_k$$

dove  $y_k, x_k$  e  $n_k$  sono variabili aleatorie.

Generalmente il canale è anch'esso un processo aleatorio, di conseguenza anche  $h_k$  è una variabile aleatoria, ma se il canale varia lentamente nel tempo allora la  $h_k$  può essere considerata costante per ogni istante  $k$  per il quale il canale è costante.

Se ora consideriamo un sistema MIMO a banda stretta, la relazione ingresso uscita in un generico istante è:

$$\underline{y} = \underline{H}\underline{x} + \underline{n}$$

Dove  $\underline{y}$  rappresenta il vettore dei segnali ricevuti (dimensione  $N \times 1$ ),  $\underline{x}$  il vettore dei segnali trasmessi (dimensione  $M \times 1$ ),  $\underline{n}$  rappresenta il vettore contenente i campioni di rumore (dimensione  $N \times 1$ ) e  $\underline{H}$  la

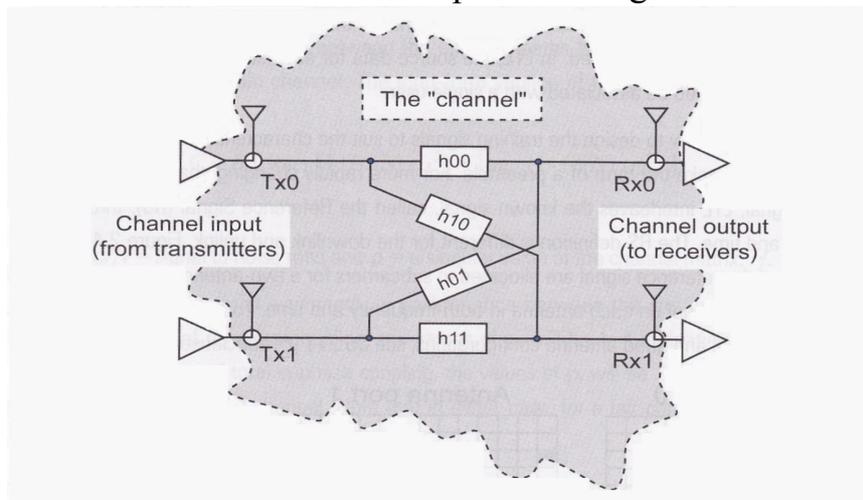
matrice (dimensioni  $N \times M$ ) delle risposte impulsive o matrice di canale.

$$\underline{\underline{H}} = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdot & \cdot & h_{1M} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ h_{N1} & \cdot & \cdot & h_{NM} \end{bmatrix} \quad 1.1$$

Le relazioni ingresso uscita possono essere scritte nel seguente modo:

$$y_i = \sum_{j=1}^M h_{ij} x_j + n_i \quad \text{with } i = 1, 2, \dots, N \quad (1.2)$$

dove il generico elemento  $h_{ij}$  rappresenta il coefficiente complesso di canale fra il  $j$ -esimo trasmettitore e l' $i$ -esimo ricevitore. Un esempio di canale in un sistema MIMO 2x2 è riportato in figura 1.2



**Figura 1.2: rappresentazione equivalente di canale MIMO 2x2**

La figura mostra come il segnale trasmesso da ogni Tx arrivi ad entrambi gli Rx, influenzando il segnale di ognuno di essi. Questo comportamento è causato dalla propagazione multicammino e dalla presenza del fading. Tale criterio sta alla base delle tre diverse idee utili all'implementazione dei sistemi MIMO.

## 1.3 Caratteristiche dei sistemi MIMO [2]

### 1.3.1 Diversity

Con questo nome andiamo a indicare le tecniche che combattono il fast fading. Questa tecnica si basa sul fatto di utilizzare più repliche del segnale per poi trasmetterle nel tempo, nella frequenza o nello spazio.

Nella *time diversity* si trasmettono copie del segnale nel tempo, attraverso l'utilizzo di tecniche di codifica di canale che si combinano ai ritardi temporali introdotti tra le varie repliche del segnale trasmesso. Per ottenere un corretto comportamento, in questo metodo, è necessario che la distanza temporale fra le repliche del segnale sia superiore al tempo di coerenza del canale ( $T_c$ =tempo nel quale il canale non ha variazioni significative).

Per la *Frequency diversity* invece si trasmettono repliche del segnale nel dominio delle frequenze. In questo caso le repliche in frequenza devono essere trasmesse ad una distanza frequenziale superiore alla banda di coerenza del canale ( $B_c=1/\Delta t$ ) nella quale il canale presenta un fading piatto.

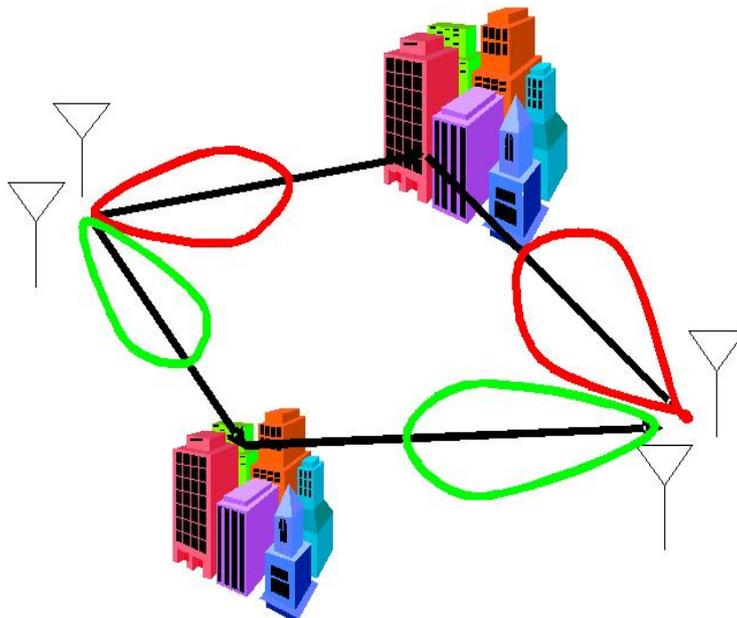
Per ultima la *spatial diversity*, questa è la tecnica più utilizzata per combattere il fast fading introdotto dai cammini multipli. In questo caso le repliche dello stesso segnale trasmesso sono ricevute da differenti antenne in ricezione, che sono poste ad una distanza superiore alla lunghezza di coerenza ( $L_c$  distanza minima al di sotto della quale il fading è correlato spazialmente).

Esistono altri due tipi di diversity, la *angle diversity* e la *polarization diversity*. La prima viene applicata quando i segnali ricevuti

provengono da direzioni diverse a causa delle interazioni con l'ambiente, nella seconda i segnali hanno una polarizzazione ortogonale e vengono trasmessi e ricevuti da due o più antenne aventi una differente polarizzazione. La *diversity* è inoltre discriminabile se è applicata in ricezione o in trasmissione, nella prima si parla di diversità di ricezione mentre nella seconda di diversità di trasmissione

### 1.3.2 Beamforming

Questa tecnica è basata sulla possibilità, data dal guadagno di schiera, di orientare il segnale trasmesso nella direzione voluta con un certo offset di fase e di ampiezza. Grazie a questa possibilità molti segnali (o lo stesso segnale) possono essere trasmessi in direzioni diverse, essi verranno ricevuti da antenne opportunamente settate, in accordo con la propagazione multicammino generata dall'ambiente. In figura 1.3 è mostrato un esempio di questa tecnica.



**Figura 1.3: tecnica del Beamforming**

### **1.3.3 Multiplexing**

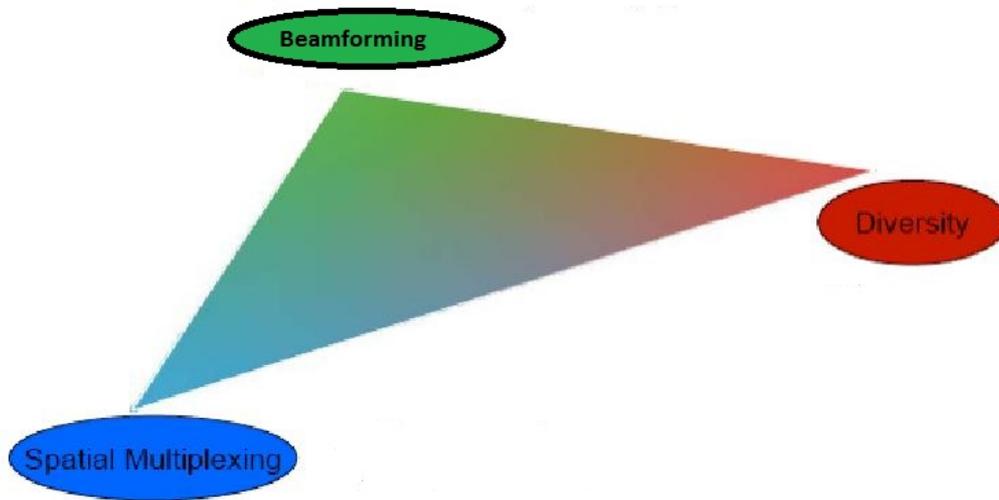
La tecnica del multiplexing permette di aumentare in maniera lineare la data rate in proporzione al numero di coppie di antenne Rx-Tx che si ha a disposizione, senza l'aumento di banda e senza l'aumento di potenza in trasmissione. Il flusso di dati che vogliamo trasmettere è separato in due o più parti uguali che verranno poi trasmesse in maniera simultanea. In questo modo la data rate del segnale trasmesso sarà una frazione del intero flusso dati che abbiamo prima della trasmissione. La data rate migliora perchè sfruttiamo più volte la capacità di un sistema SISO in un sistema MIMO che è composto da più sistemi SISO, i quali sfruttano lo stesso mezzo di trasmissione.

Il MIMO mi permette di tenere separati i flussi di dati senza che essi interferiscano tra loro. Le antenne trasmittenti per poter trasmettere in maniera ottimale devono poter conoscere il canale radio, i ricevitori inviano la stima del canale attraverso un feedback. Non è sempre possibile effettuare una buona stima del canale radio. La tecnica del multiplexing funziona bene solo se i sotto canali sono sufficientemente ortogonali fra loro, questo è possibile solo se il canale è affetto da un fading selettivo in spazio, cioè se i cammini provenienti da diverse direzioni sono sufficientemente decorrelati.

### **1.3.4 Trade off MIMO**

I sistemi MIMO reali sfruttano sia il multiplexing che la diversity attraverso una combinazione di multiplexing spaziale e di codifica spazio temporale. Ci sono dei compromessi che diversificano il funzionamento dei sistemi MIMO; se si usa il multiplexing in trasmissione per avere la massima data rate, non possiamo trasmettere

in diversità, dato che per sfruttare quest'ultima è obbligatorio trasmettere repliche dello stesso flusso dati.



**Figura 1.4: trade off sistemi MIMO**

Il triangolo in figura 1.4 raffigura come ogni punto preso al suo interno corrisponda ad una possibile soluzione del sistema MIMO. Se si sceglie un punto al centro del triangolo il comportamento che otteniamo è quello di avere un sistema che funziona in maniera bilanciata con tutte e tre le soluzioni. Se scegliessimo un punto in un angolo del triangolo otteniamo un comportamento che favorisce una soluzione a discapito delle altre due.

## 1.4 Capacità del canale MIMO

Come per tutti i segnali radio, il recupero del segnale dipende dal rapporto segnale rumore. Grazie al teorema della capacità di Shannon la capacità di un canale radio è data dalla 1.3:

$$C = B \cdot [\log_2 (1 + \text{SNR})] \quad (1.3)$$

dove  $B$  indica la banda occupata in Hz e SNR il rapporto segnale rumore in lineare. Questa formula può essere scritta, nel caso di canale AWGN, e introducendo il guadagno complesso di canale  $|h|$  come nella 1.4:

$$C = B \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{P_T |h|^2}{\sigma^2} \right) \quad (1.4)$$

dove  $\sigma^2$  è la potenza di rumore al ricevitore.

Per i sistemi MIMO esiste un versione ancor più adatta di questa formula, che tiene conto delle interferenze fra i segnali trasmessi da ogni Tx per ciascuna antenna Rx.

In questo caso la formula della capacità del sistema MIMO sarà:

$$C = B \cdot [\log_2 (1 + (S/N) \cdot \rho_1^2) + \log_2 (1 + (S/N) \cdot \rho_2^2) + \dots + \log_2 (1 + (S/N) \cdot \rho_n^2)]$$

dove  $S/N$  è il SNR del segnale al ricevitore, e  $\rho_i$  è il valore singolare della matrice di canale. In generale, se il valore di  $\rho_i$  è 1, questo sta a indicare che il sottocanale non è affetto da interferenze, ciò accade quando non si ha accoppiamento fra i segnali. Se tale valore è 0 ciò significa che quel determinato sottocanale è completamente affetto da interferenza, e non apporta contributo alla capacità di canale.

Se in un sistema MIMO 2X2 uno dei due sottocanali ha un  $\rho_i=0$  vuol dire che la capacità di sistema è pari a quella di un sistema SISO.

#### 1.4.1 Condition Number

Il condition number abbreviato CN, è un importante parametro dal quale è possibile valutare la capacità di canale. E' definito come il

rapporto dei valori singolari della matrice di canale, e può essere utilizzato per indicare il SNR necessario per recuperare il segnale MIMO, relativo al caso SISO. Buoni valori di CN sono quelli compresi tra 0 dBm e 10 dBm, al di sopra di 10 dBm il canale si degrada e la demodulazione del segnale ricevuto diventa più difficile. Se il valore di CN è pari a 0 questo significa che i valori nella diagonale della matrice di canale  $H$  sono perfettamente bilanciati.

Il CN può essere così valutato:

$$\max(\text{eig}(H \cdot H^H)) / \min(\text{eig}(H \cdot H^H)) \quad (1.5)$$

Nella 1.5 con  $\text{eig}(H \cdot H^H)$  si indicano gli autovalori del prodotto fra la matrice  $H$  e la matrice  $H^H$  dove l'apice  $H$  indica il trasposto coniugato.

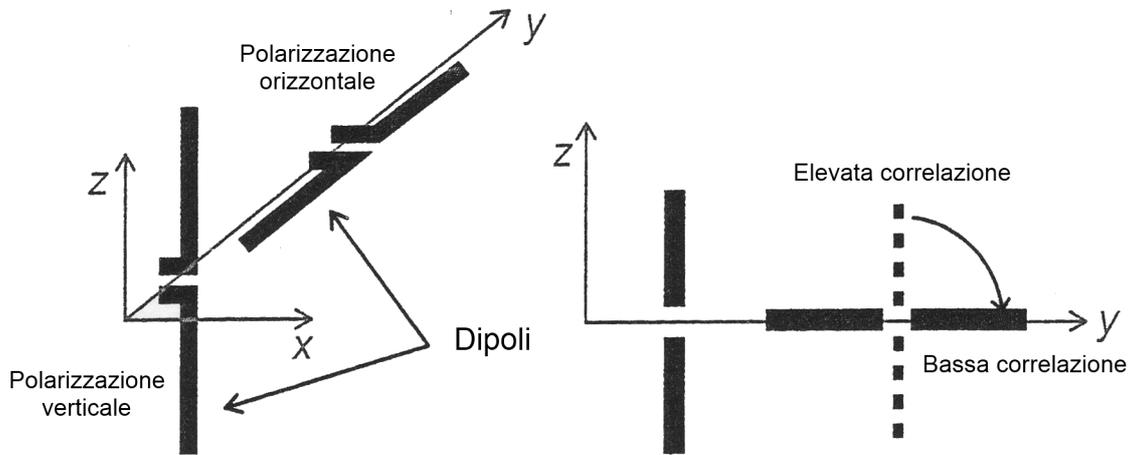
#### **1.4.1 Correlazione spaziale**

I sistemi MIMO richiedono un ambiente ricco di cammini multipli per ottenere un funzionamento ottimale, la posizione spaziale delle antenne di trasmissione influenza la correlazione del fading di un canale rispetto ad un altro canale MIMO. Lo stesso accade per il sistema ricevente, una spaziatura tra le antenne insufficiente porta a correlazione spaziale tra i canali, questo si ripercuote negativamente sulle prestazioni MIMO. Si è visto che una distanza maggiore in termini di ordini di lunghezza d'onda tra le antenne, va a incidere sulla correlazione tra i canali di un sistema ad antenne multiple.

#### **1.4.2 Sistemi MIMO in cross-polarizzazione**

Sfortunatamente, le dimensioni dei dispositivi wireless sono ridotte, questo contrasta la possibilità di mantenere le antenne separate e quindi di diminuire la correlazione tra i canali. Una possibile

soluzione è quella di adottare la cross-polarizzazione per le antenne.



**Figura 1.6: antenne in cross-polarizzazione**

In un sistema MIMO 2x2, per entrambi gli apparati, trasmittente e ricevente possiamo utilizzare un sistema che prevede, un antenna polarizzata verticalmente ed un antenna posizionata in modo che la sua polarizzazione sia orizzontale. In figura 1.6 viene mostrato il posizionamento ottimale dei dipoli, mantenendoli ortogonali si avrà che la correlazione sarà la minore possibile. È facile intuire che ruotando il dipolo verticale, e andando a sovrapporlo con quello orizzontale, otteniamo che il coefficiente di correlazione sarà massimo.

## 1.5 Propagazione Indoor

Quando si è in presenza di un dispositivo wireless che trasmettere e ricevere dati, il campo generato che sostiene il collegamento radio dal trasmettitore al ricevitore, si diffonde in tutto l'ambiente circostante. Infatti, non sempre, il trasmettitore e il ricevitore sono in linea di vista, molti sono gli oggetti che possono frapporsi fra Rx e Tx in un ambiente interno. L'iterazione del capo elettromagnetico con gli

oggetti è sorgente di molti cammini per il segnale, tale effetto provoca la nascita di un ambiente caratterizzato dalla presenza di un fading rapido. Il fading rapido è sinonimo di affievolimento del segnale, l'aggettivo rapido indica che tali affievolimenti variano nello spazio in maniera veloce e imprevedibile. La causa scatenante di questo effetto sono le cancellazioni di segnale che si creano fra i vari cammini. La presenza di fading rapido permette di percepire diverse situazioni di canale, anche facendo piccoli spostamenti, questa caratteristica è di fondamentale importanza per l'utilizzo della tecnica MIMO multiplexing, che basa il suo corretto funzionamento sulla scorrelazione dei canali. Un ambiente indoor rappresenta una situazione ricca di fading; la presenza di muri, porte, arredamenti e spigoli è sorgente di cammini multipli. Per poter studiare la propagazione in questo tipo di ambienti, è utile usare un modello di rappresentazione a raggi.

### **1.5.1 Normative sulle emissioni dei sistemi indoor**

La normativa europea sulle emissioni delle reti Wi-Fi demanda la definizione delle regole tecniche per le radioemissioni, e delle relative frequenze, a un comitato tecnico denominato ETSI (European telecommunications standards institute). La normativa tecnica a cui facciamo riferimento distingue, in funzione dell'utilizzo degli apparati, alcune caratteristiche e requisiti tecnici delle apparecchiature in funzione del loro utilizzo in ambienti chiusi cosiddetti *Indoor*, oppure in ambienti esterni o aperti detti *outdoor*. Per gli apparati operanti nelle frequenze di 2.4 GHz la potenza massima di emissione consentita è di 100 milliwatt che sono equivalenti a 20 dBm di E.I.R.P,

sia che gli apparati operino indoor sia che gli apparati operino outdoor. La sigla E.I.R.P sta per *equivalent isotropic radiated power*, che rappresenta la densità di potenza equivalente a quella misurata, ma emessa da un antenna isotropa. Senza il rispetto dei requisiti sulle emissioni non sono ottenibili ne il marchio CE ne è possibile installare, utilizzare commercializzare o importare apparecchi di tale classe.

## Capitolo 2 Lo standard LTE nei sistemi MIMO [3]

Il MIMO è una delle tecnologie scelte per implementare i sistemi LTE. Per LTE (Long Term Evolution) si intende la standard successivo al 3G già largamente diffuso. Per poter essere definito uno standard l'LTE, deve definire alcune linee guida per la costruzione di dispositivi che devono poter comunicare tra loro. I dispositivi che seguono tale standard devono soddisfare determinati requisiti in termini di prestazioni, tali obiettivi sono riportati in figura 2.0.

Requisiti	LTE
Peak data Rate	100 Mbps
Latenza	100 ms
Bandwidth	Fino a 20MHz
Spectrum Efficiency	16 bit/s/Hz
Bande di utilizzo	Varie incluse GSM UMTS

**Figura 2.0: standard LTE**

Lo standard LTE da le specifiche su sistemi MIMO 2x2 e 4x4 nel quale ogni estremità del collegamento utilizza un array di antenne che può essere composto da due o da quattro elementi. La prima delle due soluzioni è quella maggiormente diffusa, ciò è dovuto ai vincoli imposti dalle dimensioni di un terminale radio mobile. Le antenne di un terminale a due rami devono avere una distanza che li separa di almeno una mezza lunghezza d'onda, che alla frequenza di 2 GHz sarà di circa 7 cm. Un modo per ridurre ulteriormente le dimensioni del terminale, è quello di adottare un antenna che sfrutta la polarizzazione,

si possono combinare due antenne trasmettenti su polarizzazioni tra loro ortogonali. Siamo consapevoli che per poter utilizzare un MIMO a 4 rami si dovranno aumentare in modo considerevole le dimensioni del terminale mobile. Se per esempio prendiamo il caso a due rami, avremo due flussi informativi, i canali che permettono la trasmissione di tali flussi devono essere il più possibile decorrelati fra loro; se ciò accade significa che i canali MIMO sono completamente indipendenti ed una soluzione 2x2 può raddoppiare la bit rate, mentre l'impiego di un sistema 4x4 può quadruplicare la bit rate. In una situazione ideale con un sistema 4x4 lo standard LTE afferma che sarà possibile avere una velocità di trasferimento dati pari a 400 Mbit/s. È tuttavia da sottolineare che questi valori di velocità di trasferimento sono riferiti a situazioni ideali e non sono praticamente raggiungibili per una varietà di ragioni:

- La modulazione 64 QAM può essere utilizzata solo in prossimità della stazione radio base, versioni più robuste e realistiche sono il 16 QAM (4 bit/simbolo) e la QPSK (2 bit/simbolo).
- La codifica a correzione e rivelazione d'errore è indispensabile, i valori di code rate riscontrati in media sono di circa 1/3, conseguentemente l'overhead di codifica sarà del 25-30% circa.
- Anche in presenza di codifica a correzione e rivelazione d'errore, è ragionevole prevedere una ritrasmissione dei pacchetti con quote del 20% circa.
- in molti casi la larghezza di banda disponibile è inferiore ai 20 MHz
- Quando si usa la tecnica MIMO l'ordine di modulazione QAM deve essere ridotto rispetto alle condizioni ideali;

- Occorre tenere conto delle interferenze introdotte da celle vicine che operano sulla stessa banda di frequenze.

In conclusione si può affermare che il throughput in downlink, che rappresenta l'effettivo utilizzo della capacità del link, sarà in realtà del 30-50% del valore teorico.

## **2.1 Frequenze e potenze dello standard LTE**

La prima cosa da decidere quando si desidera creare un nuovo standard è la frequenza in cui trasmettere. Per LTE, sono state assegnate molte frequenze dove trasmettere e ricevere, tali frequenze sono divise per bande. Per quanto riguarda l'up-link e down-link ci sono differenze sostanziali nella trasmissione. In Europa, le due frequenze conosciute per il down-link sono 925 MHz e 2,6 GHz. Con la frequenza, anche la larghezza di banda è importante, anzi, se la questa non è appropriata, possono sorgere problemi come interferenze con le bande di canale adiacenti, o, in caso di errata stima di banda del segnale, si avrà uno spreco della stessa. Lo standard LTE da maggiore flessibilità da questo punto di vista, perché prevede 6 larghezze di banda differenti per il downlink, a partire da 1,4 MHz, e arrivando a 20 MHz. La banda a 5 Mhz è la stessa utilizzata nell'UMTS, essa viene scelta per il riutilizzo dello spettro di tale standard. Ovviamente, tutta questa flessibilità va ad aumentare la complessità dei dispositivi che utilizzano standard LTE. La Potenza di trasmissione è un altro importante aspetto dove concentrare l'attenzione, soprattutto al giorno d'oggi, in cui si affrontano discussioni sulle eventuali problematiche che l'inquinamento elettromagnetico potrebbe provocare alla salute. La potenza di trasmissione è strettamente legata al tipo di

modulazione e alla dimensione della banda di canale che viene utilizzata dallo standard.

## **2.2 Interfaccia radio**

L'interfaccia radio in ambiente LTE abbandona la soluzione adottata dall'UMTS, che impiega una sola portante a sostegno di una larga banda di frequenza, LTE adotta uno schema multi-portante. I vantaggi sostanziali di questa soluzione risiedono nella possibilità di meglio fronteggiare il fenomeno dei cammini multipli e il conseguente spreading dei ritardi sui diversi cammini tra emettitore e ricevitore. Per il down-link si sfrutta la tecnica OFDMA, tale tecnica costituita da un OFDM multi utente che consente l'accesso multiplo al canale. L'accesso multiplo è ottenuto assegnando a ciascun utente dei gruppi di sottoportanti, permettendo così di ottenere un velocità di trasferimento dati relativamente bassa da parte di ogni utente. L'OFDM, per esteso Orthogonal Frequency Division Multiplexing è lo schema di modulazione scelto per il down-link LTE. Si tratta di un schema digitale multi-portante, che usa un gran numero di sottoportanti piuttosto ravvicinate fra loro, esse sono utilizzate per poter trasmettere dati e informazioni di controllo. Ogni sottoportante è modulata con un velocità di simbolo bassa, le modulazioni possibili per le sottoportanti sono la QPSK, 16QAM e la 64QAM. Tutte queste sottoportanti modulate con una bassa velocità di trasmissione dati, hanno insieme una velocità di trasferimento dati simile alla trasmissioni a singola portante che utilizzano la stessa banda.

### 2.2.1 Composizione del segnale OFDM

Il segnale OFDM è formato da un gran numero di forme d'onda continue che sono spazialmente ravvicinate nel dominio delle frequenze. Il tipo di modulazione applicata alle sottoportanti è la modulazione di fase in quadratura d'onda che produce uno spettro di frequenza formato da delle sinc. La velocità di variazione della modulazione di fase, determina la posizione del passaggio per lo zero in frequenza. Il trucco utilizzato dall'OFDM, è quello di collegare il tasso di modulazione della sottoportante alla spaziatura utilizzata dalle sottoportanti. In questo modo, il valore nullo nello spettro di una sottoportante sarà allineato con i picchi delle sottoportanti adiacenti. Nell'LTE la durata di ogni simbolo è di  $66.7 \mu\text{s}$ , quindi la spaziatura delle sottoportanti sarà di  $1/66.7 \mu\text{s}$  che corrisponde a 15 kHz. Questa spaziatura permette di avere tante sottoportanti in base alla dimensione di banda utilizzata per il down-link. Nella tabella in figura 2.1 sono mostrate il numero di sottoportanti in base alla banda utilizzata.

Larghezza di banda (MHz)	Numero di sottoportanti
1,25	76
2,5	151
5	301
10	601
15	901
20	1201

**Figura 2.1: numero sottoportanti nell'OFDM**

La banda a 20 MHz mi permette di avere una velocità di trasmissione

superiore dato che utilizza un maggior numero di sottoportanti.

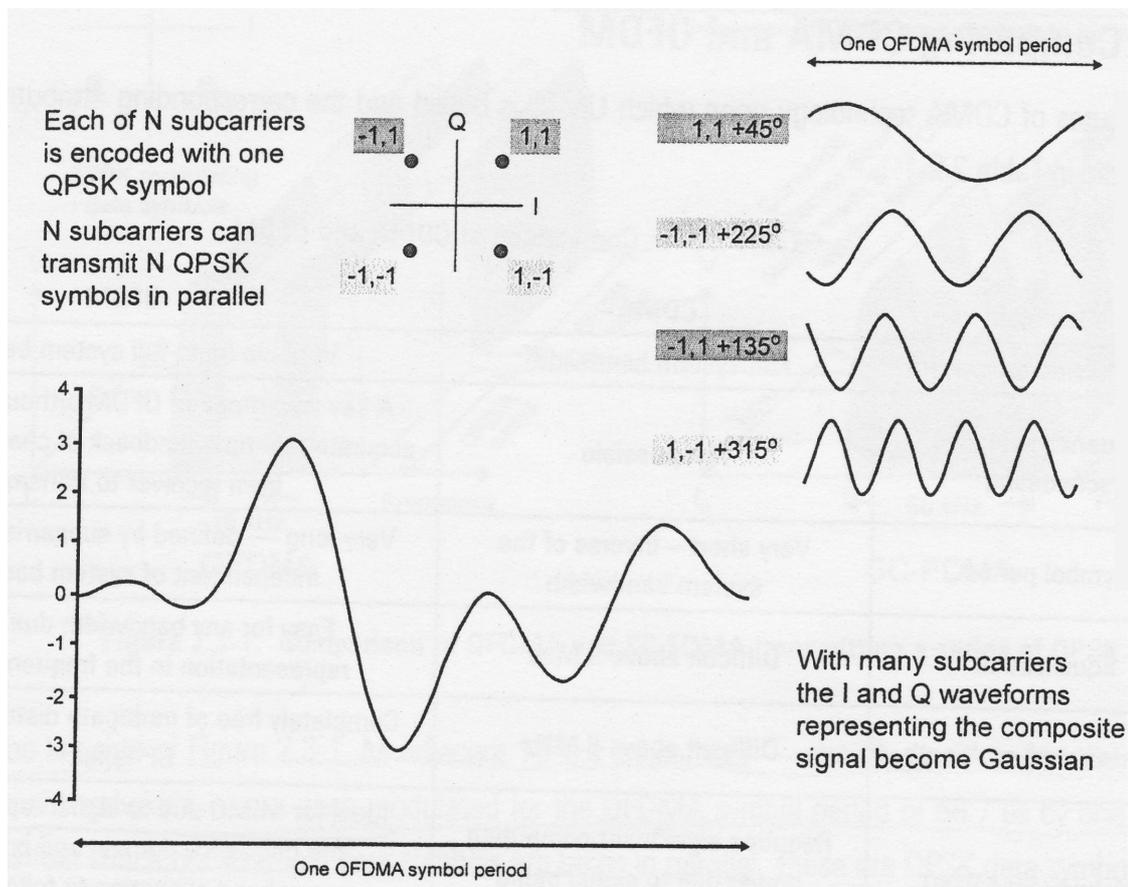
### **2.2.2 Interferenza intersimbolica**

Questo problema noto come ISI, è causato dalla dispersione dei ritardi nel canale di trasmissione. Per capire tale problematica, basta immaginare che il canale sia affetto da una propagazione multicammino e che quindi divida il segnale in molte copie, più o meno ritardate di se stesso. Ogni copia ha associato un suo ritardo che dipende dal percorso seguito dal segnale. L'invio di un segnale in questo canale comporta la ricezione di copie ritardate, che sommate creano un segnale diverso da quello originale per una parte di esso; la lunghezza della parte corrotta dipende dal ritardo massimo tra tutti i percorsi ricevuti dello stesso segnale. Per ridurre questo problema, è stato introdotto un periodo temporale chiamato intervallo di guardia che viene frapposto tra ogni simbolo. Se il periodo di guardia è più lungo del ritardo massimo introdotto dal canale radio, e ogni simbolo OFDM viene ciclicamente esteso del periodo di guardia, nel quale viene introdotto un prefisso ciclico copiando la parte finale del simbolo all'inizio di ogni simbolo. Così facendo l'interferenza intersimbolica è completamente eliminata.

### **2.2.3 Generazione del segnale**

Il vantaggio della modulazione OFDM è che si possono trasmettere più simboli parallelamente, uno per ciascuna sottoportante. Un esempio viene dato considerando 4 sottoportanti, che trasportano 4 simboli dati. Questi simboli sono mappati ad ogni sottoportante per una durata del simbolo OFDM. Se il simbolo è modulato con una QPSK, la costellazione è composto da 4 punti (1,1), (-1,1), (-1, -1) e

(1, -1). Ogni sottoportante è definita nel dominio della frequenza da un vettore, che rappresenta l'ampiezza e la fase del simbolo dati che è stato mappato in esso. Quando tutti i simboli sono stati mappati, ogni sottoportante viene convertita in forma d'onda nel dominio temporale utilizzando la IFFT (Inverse Fast Fourier Transform). Dopo essere stato trasformato il segnale è pronto per essere trasmesso. In figura 2.2 è riportato l'esempio illustrato in precedenza.



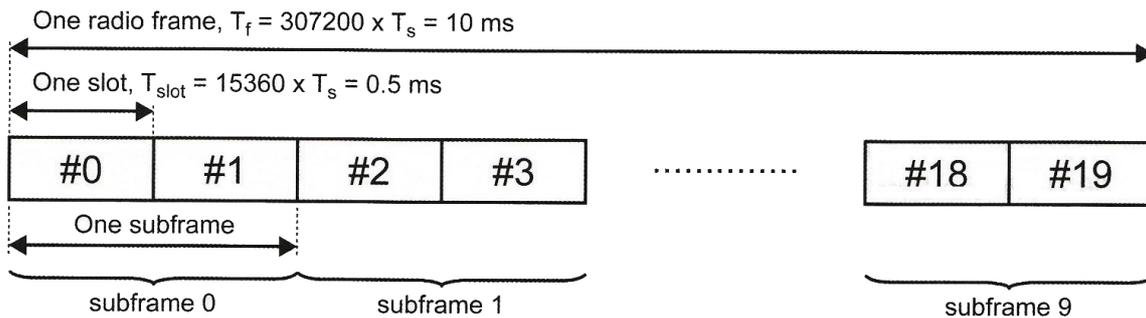
**Figura 2.2**

#### 2.2.4 Struttura della frame LTE

La struttura del frame LTE è suddivisa in sotto unità. La struttura complessiva può essere caratterizzata nel dominio del tempo e nel dominio della frequenza; la sua lunghezza è espressa in unità di

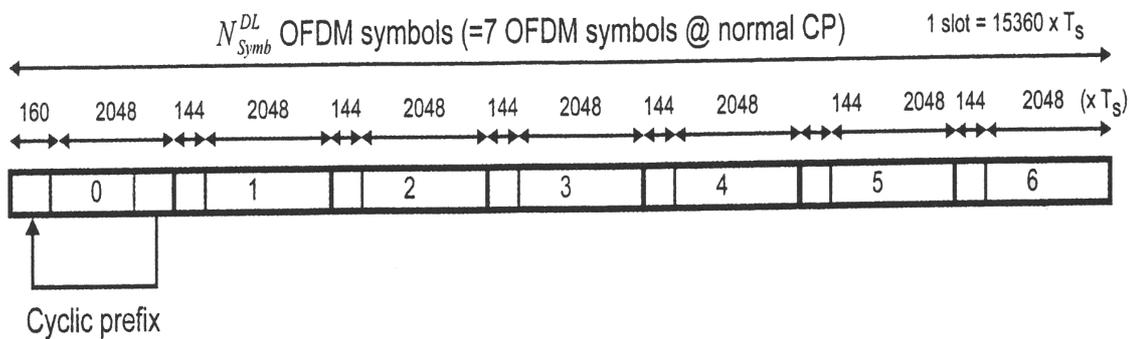
temporali  $T_s$  ( $T_s = 1 / (15000 * 2048) = 32,55 \text{ ns}$ ).

Dal lato del dominio frequenziale, il frame è diviso in 10 subframe, ciascuno di essi ha la durata di 1 ms; ogni subframe è ulteriormente diviso in due sotto unità chiamate slot di 0,5 ms ciascuno. Una frame LTE è quindi composta da 20 slot. In figura 2.3 è mostrata l'intera trama LTE.



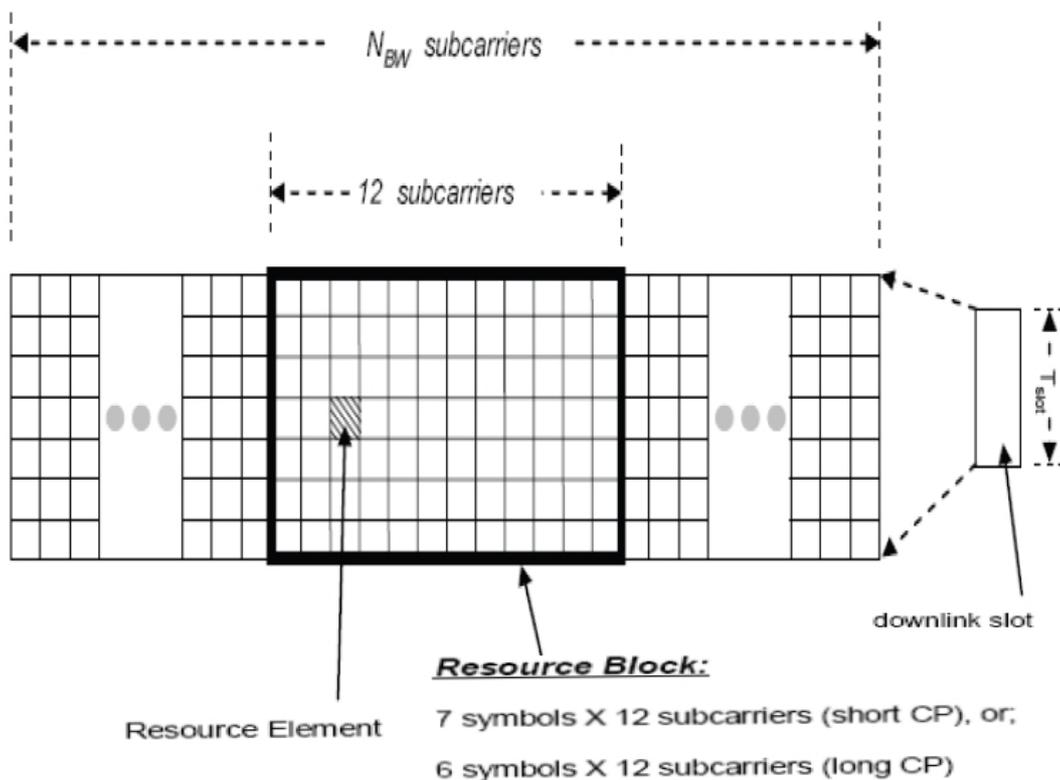
**Figura 2.3: trama frame LTE**

Ogni slot è formato da più simboli OFDM, si hanno due possibili soluzioni in base alla lunghezza del prefisso ciclico voluto. La prima è quella di utilizzare un prefisso ciclico corto è quindi lo slot sarà composto da 7 simboli OFDM. Altrimenti, se si sceglie di utilizzare un prefisso ciclico lungo lo slot sarà composto da 6 simboli OFDM. In figura 2.4 è mostrata la composizione dello slot temporale con prefisso ciclico corto.



**Figura 2.4: Slot temporete LTE**

Per la trasmissione delle informazioni lo standard LTE utilizza una struttura composta da elementi chiamati resource element, che sono le più piccole unità dello strato fisico, tale elemento occupa un simbolo OFDM nel dominio del tempo e una sottoportante nel dominio della frequenza. Ciascun elemento è contenuto in un resource block, come è mostrato nella figura 2.5, che sono l'unità più piccola che può essere programmata per la trasmissione. Un resource block occupa 0,5 ms nel dominio del tempo e 180 kHz nel dominio della frequenza.



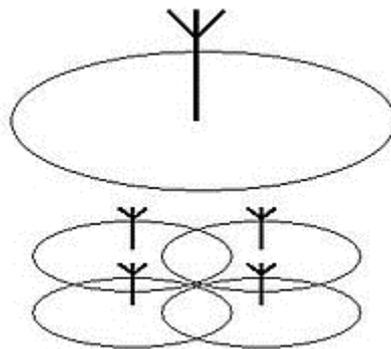
**Figura 2.5: Resource block LTE**

Le dimensioni di un resource block sono date dal prodotto del numero di sottoportanti per il numero di simboli contenuti in ogni time slot.



## Capitolo 3 Tecniche DAS

La copertura e la distribuzione di un segnale radio, è uno degli aspetti fondamentali del mercato delle telecomunicazioni al giorno d'oggi. Gli utenti desiderano che i loro sistemi mobili possano accedere a servizi di rete in qualsiasi luogo essi si trovino. In luoghi dove la copertura è limitata dalle infrastrutture come gallerie, o in luoghi in cui la presenza di un elevato numero di utenti rende difficile l'accesso alle risorse. In questi contesti, l'aggiunta di una stazione radio base per trasportare il segnale wireless non è la soluzione ottimale in termini di costi e prestazioni. Una buona soluzione a questo problema è l'utilizzo delle tecnica denominata DAS (distributed antenna system), è una tecnica che prevede l'utilizzo di una rete di antenne remote RAU (remote antenna unit), separate spazialmente fra loro, e connesse a un unica stazione radio base che rappresenta la sorgente. Tale sorgente invia le repliche del segnale a tutte le antenne remote; i segnali inviati viaggiano su un mezzo fisico che può essere fatto di fibra ottica o da un più economico cavo coassiale. La rete di antenne she costituisce il sistema ha il compito di garantire servizi wireless all'interno di un area geografica o di una struttura.



**Figura 3.0**

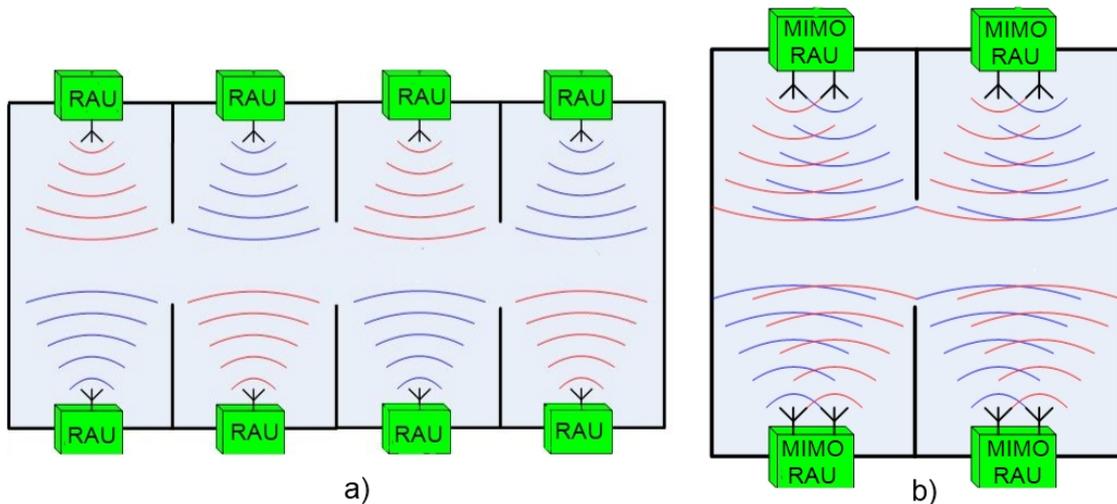
Come illustrato in figura 3.0, l'idea è quella di suddividere la potenza che sarebbe stata trasmessa dalla singola stazione radio e utilizzarla nelle antenne remote distribuite nella stessa area di copertura. Ne risulta che la potenza totale sarà ridotta e si avrà una maggiore affidabilità nel collegamento. Un sistema DAS situato in un ambiente indoor fa sì che il segnale sia meno influenzato dalle perdite per attraversamento di muri e dalle perdite di shadowing, questo perché si presentano maggiori situazioni in cui il terminale mobile è in linea di vista rispetto alle antenne remote. Una conseguenza diretta è la diminuzione del ritardo del segnale rispetto ai sistemi non DAS.

### **3.1 Estensione dei sistemi DAS alle tecniche di trasmissione**

#### **MIMO**

L'utilizzo delle tecniche DAS permette di sfruttare in miglior modo le proprietà dei sistemi MIMO. La caratteristica fondamentale per un buon utilizzo di un sistema MIMO, è che i canali di comunicazione che si creano, siano il più possibile decorrelati fra loro, perché questo avvenga le antenne di entrambi gli apparati, trasmettente e ricevente, devono essere collocate ad una distanza multipla della lunghezza d'onda. Nei sistemi DAS MIMO le antenne del apparato trasmettente sono distribuite nello spazio ad una distanza molto maggiore della lunghezza d'onda, questo fa sì che i canali siano completamente decorrelati. L'indipendenza dei canali consente ad ogni coppia trasmettitore ricevitore di avere un proprio flusso informativo completamente indipendente dagli altri, grazie al multiplexing dei sistemi MIMO si può aumentare la data rate in maniera proporzionale al numero di coppie Tx-Rx. Nello studio fatto nell'articolo [4] sono

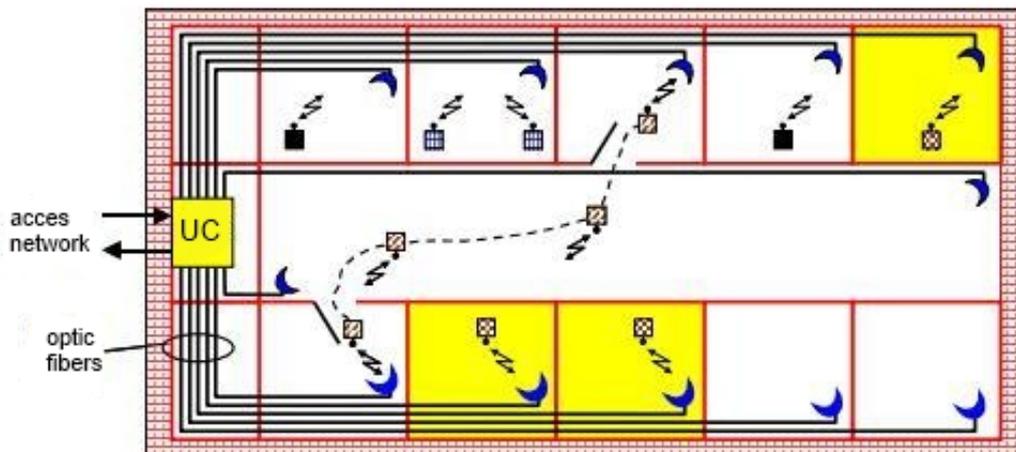
state analizzate e confrontate le caratteristiche di un sistema interleaved MIMO DAS 2x2 con un sistema co-located MIMO DAS 2x2. La differenza sostanziale fra i due sistemi è che nell'interleaved MIMO DAS i rami del sistema sono distribuiti e ripetuti nello spazio in modo da garantire una buona copertura da ogni ramo. Nel co-located MIMO DAS le antenne del sistema sono postè nella posizione ad una distanza paragonabile alla lunghezza d'onda. Per poter garantire la copertura dell'ambiente, il sistema viene ripetuto in maniera distribuita nello spazio. In figura 3.1 vengono mostrati i due tipi di sistemi appena descritti.



**Figura 3.1: a)interleaved MIMO DAS b)co-located MIMO DAS**

Come si può notare in figura il numero di antenne per il caso co-located è doppio a parità di postazioni di installazione, quindi anche il costo di realizzazione è molto maggiore. Gli studi fatti hanno mostrato che il co-located MIMO DAS è leggermente più performante, a discapito dei costi raddoppiati di installazione. Di conseguenza il sistema interleaved MIMO DAS è risultato essere il miglior compromesso in termini di prestazioni e costi.

La distribuzione delle antenne nell'ambiente, solitamente è data dalla necessità di avere una copertura uniforme dell'edificio o dell'infrastruttura dove il sistema è collocato. La copertura complessiva è data dalla sovrapposizione delle coperture fornite da ogni antenna, quindi, se ciascuna antenne copre una piccola area, due antenne vicine fra loro copriranno un area di dimensioni maggiori. Un altro fattore fondamentale per definire il posizionamento delle antenne si basa sul tipo di ambiente in cui effettueremo la pianificazione. In un ambiente indoor la presenza di pareti più o meno spesse, la presenza di arredamento sono fattori fondamentali da tenere in considerazione; concludendo si può affermare che la struttura complessiva dell'edificio influenza il posizionamento delle antenne. La presenza di ostacoli attenua la potenza del segnale, inoltre l'esistenza di altri sistemi wireless può contribuire al disturbo del sistema DAS MIMO.



**Figura 3.1: distribuzione delle antenne remote in ambienti indoor**  
In figura 3.1 si ha una distribuzione delle antenne remote in un

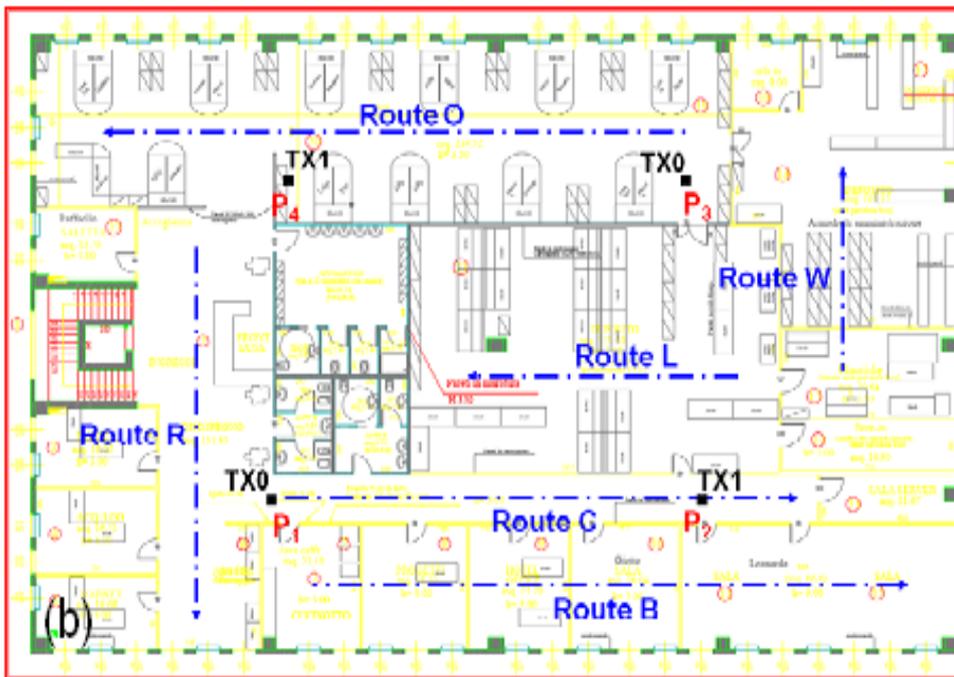
ambiente indoor in le quali sono connesse ad un unità centrale tramite una fibra ottica. La distribuzione delle RAU in un ambiente indoor, da la possibilità di concentrare la complessità di elaborazione e gli aspetti gestionali del sistema di comunicazione in un unico punto. Gli acces point delle RAU risiedono all'interno dell'unità centrale, e non direttamente sulle antenne, questo fa sì che la realizzazione sia più economica e di più semplice implementazione. La tecnica utilizzata consiste nel trasmettere il segnale radio, già modulato e pronto per essere trasmesso in aria, che in realtà verrà trasmesso al RAU tramite la fibra ottica. In questo modo la RAU dovrà avere un trasduttore optoelettronico per convertire il segnale ottico, in un segnale radio. Questo tipo di scelta da origine ad una maggiore flessibilità della rete, perché ogni cambiamento del segnale trasmesso o dello standard utilizzato, sarà attuato soltanto nell'unità di controllo centrale, e non in tutte le antenne distribuiti nell'edificio. L'utilizzo di questa tecnica congiunta alla tecnologia MIMO e ad una scelta appropriata per il posizionamento delle RAU, può dare molti vantaggi rispetto al tradizionale MIMO concentrato, sia in termini di copertura che in termini di diversità. Da un punto di vista pratico, al fine di ottenere una buona copertura in termini di segnale e un aumento di capacità di trasmissione, le RAU devono essere ben posizionate nello spazio, permettendo al terminale mobile di sentire il maggior numero di rami resi disponibili dal sistema. Uno dei parametri fondamentali per il successo di un sistema I-DAS MIMO è quello di avere un buon bilanciamento fra le potenze ricevute dalle differenti antenne remote che compongono l'array di trasmissione del MIMO considerato.



## Capitolo 4 Valutazione delle prestazioni di un sistema i-MIMO DAS 2x2

### 4.1 Ambiente di riferimento e ray tracing

Negli studi precedenti sono state svolte misure su di un sistema interleaved MIMO DAS 2x2, in un tipico ambiente indoor. Si sono considerati più percorsi di ricezione in diverse zone dello scenario, al fine di ottenere un accurata caratterizzazione dell'ambiente. Le antenne trasmettenti RAU "remote antenna unit" sono state posizionate come in figura 3.0, in modo da ottenere la miglior copertura possibile.



**Figura 4.0: pianificazione i-MIMO 2X2 DAS in ambiente uffici ATFI**

Nella figura soprastante è mostrata la disposizione ottimale che si ha per due ripetizioni dell'array di trasmissione, le antenne sono disposte in maniera interleaved così da avere la miglior copertura da entrambe le RAU. Per quanto riguarda l'antenna in ricezione, questa è un composta da due antenne distanziare di  $\lambda/2$ . Il canale radio è stato

caratterizzato mediante l'utilizzo del simulatore 3D ray-tracing, che considera anche lo scattering diffuso. Il modello di scattering è stato introdotto per tenere conto delle irregolarità interne ed esterne dei muri e della presenza di arredamento. Il modello di canale che si ottiene è in grado di dare previsioni sui parametri multidimensionali in funzione del tempo, del ritardo dei cammini, degli angoli e della polarizzazione; tutti questi parametri mi permettono di rappresentare in maniera affidabile il canale MIMO. In tabella sono riportati i valori per le simulazioni del ray-tracing.

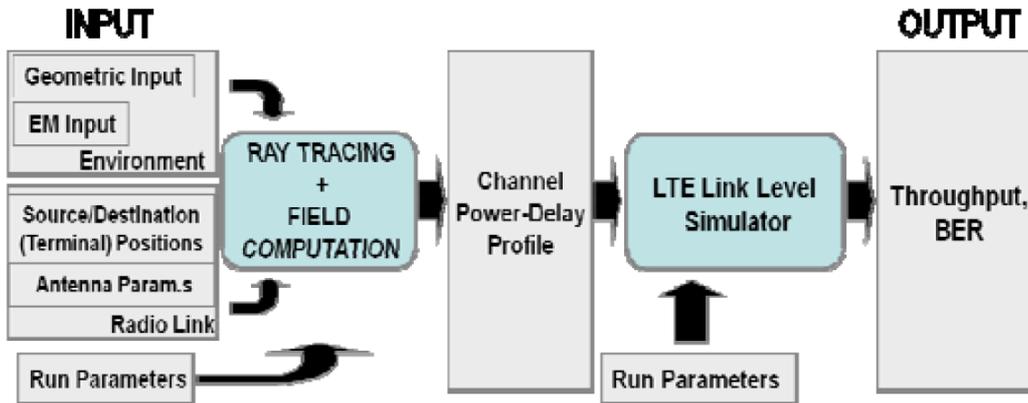
Route	Number of Locations	Step [m]	RX Spatial Samples	Samples Spacing	RX Antenna Spacing
B	28	1	100	$\lambda/10$	$\lambda/2$
R	19				
C	24				
L	16				
W	12				
O	30				

I punti di ricezione nelle route sono distanziati di 1 metro e per ogni punto del percorso "Number of locations" sono stati presi dall'apparato ricevente 100 campioni equispaziati di  $\lambda/10$ , in modo da poter considerare il fast fading e ottenere diverse realizzazioni della matrice di canale. Queste diverse realizzazioni sono rappresentative delle piccole variazioni del canale MIMO LTE che possono verificarsi per ogni TTI (transmission time interval). I risultati ottenuti con il simulatore di ray-tracing sono le matrici di canale nel dominio del tempo e del ritardo temporale, queste vengono date come input al simulatore LTE sviluppato dall'università tecnica di Vienna[5], al fine

di analizzare la reale capacità del sistema MIMO considerato.

## 4.2 Parametri delle simulazioni LTE

In figura 3.1 viene mostrata il diagramma di flusso dell'intera catena di simulazione.



**Figura 3.1: catena di simulazione LTE**

le matrici di canale prodotte dal simulatore di ray tracing vengono date in pasto al simulatore LTE. Nella tabella seguente sono riportati i parametri utilizzati per le simulazioni LTE.

Number of TX antennas	2
Number of RX antennas	2
LTE MIMO mode	Down link Single User MIMO
LTE transmit mode	4 (Closed loop spatial multiplexing)
UE Speed	0 m/sec
Channel bandwidth	20 MHz
Rx Noise Figure	3 dB
Uplink delay	0 TTI
Fading type	Block fading
Number of TTI	100
MAC Scheduler	Dynamic, Best CQI RB assignment

Si vuole simulare un sistema MIMO 2x2 come indicato in tabella. Nel *single user MIMO* le antenne multiple sono collegate ad unico

terminale.

La tipologia di trasmissione LTE utilizzata è quella del *Closed loop spatial multiplexing* che prevede la conoscenza da parte dei trasmettitori dello stato del canale. Dato che non ci può essere un feedback continuo da parte delle antenne riceventi lo stato del canale non è sempre aggiornato.

*UE speed* indica la velocità di spostamento del ricevitore che nel nostro caso è nulla, perchè quest'ultimo è fermo.

Il parametro *Uplink Delay* posto a 0 TTI "time transmission interval" indica che non c'è ritardo di trasmissione in uplink.

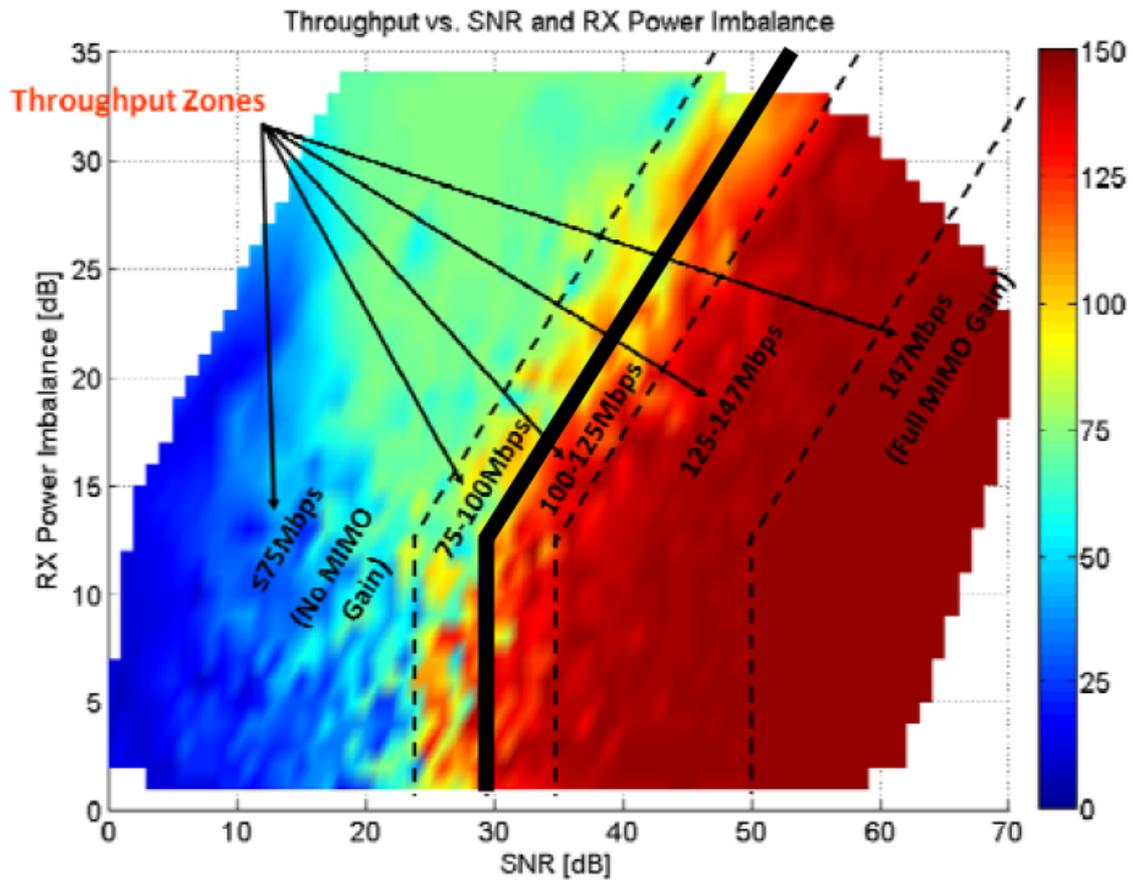
Il *Fading type* è impostato a block fading, sta a indicare che il fading non varia per almeno un tempo di trasmissione(1 TTI).

Il numero intervalli di trasmissione è impostato a 100, per ognuno di questi il simulatore calcola le matrici di canale e ne valuta le prestazioni facendo la media su tutte le realizzazioni.

### **4.3 Risultati ottenuti**

Attraverso l'utilizzo della catena di simulazione riportata nel paragrafo 4.2 si sono ottenuti più parametri di valutazione delle prestazioni del sistema. In particolare per il sistema interleaved MIMO DAS preso in considerazione nella figura 4.0 del paragrafo 4.1, si è ricavato il throughput in funzione del SNR complessivo. Il valore di throughput è stato poi mediato su tutti i percorsi fatti dal ricevitore, in modo da avere una caratterizzazione del rendimento del sistema in tutto l'ambiente considerato. Per poter studiare l'effetto dello sbilanciamento dei segnali ricevuti dalle varie RAU, si è preso il throughput del sistema interleaved MIMO DAS 2x2 e lo si è riportato

in un plot multidimensionale in funzione del SNR complessivo e del power imbalance. Il power imbalance è dato dalla differenza delle potenze provenienti dai diversi rami MIMO.



**Figura 4.2: Throughput i-MIMO 2x2 DAS [4]**

Dalla figura 4.2 si può evidenziare l'influenza dello sbilanciamento di potenza fra i differenti rami MIMO. Questo aspetto è di fondamentale importanza per una adeguata pianificazione di un sistema DAS MIMO. Per un sistema i-MIMO 2x2 DAS che sfrutta lo spatial multiplexing il throughput deve stare nella zona rossa dove si ha una capacità di trasmissione superiore ai 100 Mbps. Il power imbalance gioca un ruolo fondamentale; infatti se ci si trova con un SNR di circa 30 dB per far sì che il sistema sfrutti le proprie capacità non si deve

avere uno sbilanciamento di potenza fra le RAU di oltre 15 dB. Nel grafico sopra riportato si deve considerare la coppia SNR e power imbalance, se l'intersezione di tali valori cade nella zona rossa il sistema funzionerà correttamente. Si ottengono bassi valori di power imbalance se si ha una buona sovrapposizione delle aree di copertura delle diverse RAU; di conseguenza il throughput ottimale per il sistema LTE si ottiene se si ha una copertura uniforme dell'ambiente preso in considerazione. Il nostro scopo sarà quello di fornire delle indicazioni su come pianificare sistemi i-MIMO DAS di ordine superiore a quello a due rami che abbiamo analizzato in questo capitolo.

#### **4.4 Osservazione sul funzionamento dei rami**

Dagli studi effettuati per il caso di sistema interleaved DAS MIMO 2X2 si è potuto estrapolare che il Power Imbalance gioca un ruolo fondamentale nel funzionamento del sistema. Infatti per valori di sbilanciamento elevati il throughput scende inevitabilmente. Andiamo ora a effettuare delle osservazioni sul grafico multidimensionale mostrato in figura 4.2 dove viene riportato il grafico riguardante il throughput del sistema i-MIMO 2x2 DAS. Nel grafico è stata rimarcata la spezzata che separa le due zone di funzionamento; la parte destra è quella dove il throughput aumenta notevolmente grazie al MIMO multiplexing, mentre nella parte sinistra il throughput diminuisce perchè non si sfruttano i vantaggi del MIMO e la capacità si riduce a quella di un sistema SISO. Dalla figura 4.2 si sono ricavate due ipotesi che noi utilizzeremo come condizioni per la valutazione di sistemi con più di 2 rami.

La retta verticale impone la prima condizione sul SNR complessivo:

$$1) SNR > 30 \text{ dB} \quad (5.0)$$

La retta inclinata ha un coefficiente angolare che è pressoché unitario, da questa si può ricavare la disequazione in dB:

$$Power\ Imbalance \leq SNR - 15 \quad (5.1)$$

Il Power Imbalance di un sistema a due rami si riassume come la differenza delle potenze ricevute da essi

$$Power\ Imbalance = P1 - P2 \quad (5.2)$$

Si introduce l'ipotesi che  $P1$  sia molto maggiore di  $P2$  quindi si ha che la potenza totale è:

$$P_{tot} \approx P1 \quad (5.3)$$

Di conseguenza il SNR complessivo è dato dal contributo della potenza totale meno il rumore ( $N = -100 \text{ dBm}$ ):

$$SNR = P_{tot} - N = P1 + 100 \text{ dBm} \quad (5.4)$$

Andiamo ora a sostituire nella disequazione 5.1 le relazioni 5.2 e 5.4 otteniamo la seguente relazione in dB:

$$P1 - P2 \leq P1 + 100 - 15 \quad \rightarrow \quad P2 \geq -85 \text{ dBm} \quad (5.5)$$

Da questi semplici passaggi si ottiene che la potenza proveniente dal ramo 2 è trascurabile se è minore di  $-85 \text{ dBm}$ , da qui si estrapola la seconda condizione:

$$2) P_{min} \geq N+k \quad \text{con } N=-100 \text{ dBm} \quad (5.6)$$

La seconda condizione ci dice che il ramo deve avere una potenza superiore al rumore di  $k \text{ dB}$ . Dalle valutazioni fatte sul grafico si ottiene che il valore della soglia  $k$  è di  $15 \text{ dB}$ . Tale vincolo vale per SNR complessivi vicini alla soglia di funzionamento del sistema,  $30/40 \text{ dB}$ , sopra a tali valori non sappiamo prevedere il comportamento, ma possiamo dire con sicurezza che serviranno più di

15 dB di sbilanciamento per considerare un ramo inutile. Estendendo la condizione a sistemi MIMO di ordine superiore a quello 2X2 esaminato fin ora, possiamo affermare che tale requisito ci permette di dire se un ramo apporta o no un contributo significativo al throughput del intero sistema. Riassumendo le condizioni sono:

$$1) SNR > 30 \text{ dB} \quad 2) P_{min} \geq N+k \quad \text{con } N=-100 \text{ dBm}$$

Andremo ora ad utilizzare queste due condizioni per valutare il numero di rami inutili di un sistema DAS MIMO di ordine qualsiasi.

#### **4.5 Simulazioni LTE atte alla valutazione del throughput in funzione dello sbilanciamento dei rami**

Nel paragrafo abbiamo valutato le prestazioni di un sistema interleaved MIMO 2x2 DAS. I risultati mostrano che all'aumentare dello sbilanciamento di un ramo si riducono le prestazioni in termini di throughput del sistema. Partendo dai risultati ottenuti per il caso fino ad ora citato, nel paragrafo precedente si è fatta un ipotesi sul funzionamento dei rami di sistemi di ordine superiore al i-MIMO 2x2 DAS. Tale supposizione, reputa un ramo inutile o troppo sbilanciato per poter funzionare correttamente se questo ha una potenza di inferiore di una soglia  $k$  posta a 15 dB. Ribadiamo che tutto questo vale se i valori di SNR complessivo stanno in un range di valori compresi fra 30 ai 40 dB che sono condizioni ragionevoli per sistemi reali. Per valori superiori di SNR complessivo ci si aspetta che il ramo dovrà essere più sbilanciato rispetto agli altri per poter essere considerato inutile. Per verificare la validità dell'ipotesi fatta sul funzionamento del ramo, si è utilizzato il simulatore LTE modificato opportunamente per poter raggiungere gli obiettivi prefissati.

Nel paragrafo seguente verranno specificate le modifiche attuate nel simulatore e i parametri di simulazione utilizzati. Il nostro intento è quello di andare ad osservare il throughput del sistema simulato, per capire come questo vari in funzione dello sbilanciamento di uno o più rami del sistema. Le valutazioni che faremo daranno un'idea generale del funzionamento di un ramo, che si trova a ricevere una potenza minore rispetto al contributo portato dagli altri rami.

## **4.5.1 Specifiche di simulazione**

### **4.5.1.1 Modello di canale**

Il simulatore LTE fornitoci dall'università tecnica di Vienna basa il suo funzionamento sulle molteplici realizzazioni della matrice di canale nel dominio dei tempi e dei ritardi temporali, caratteristiche di un sistema MIMO. Nel paragrafo 4.2 del capitolo quarto le realizzazioni della matrice di canale del sistema interleaved MIMO 2x2 DAS sono state calcolate mediante l'impiego del simulatore di ray tracing che utilizza come database ambientale, quello indoor di figura 4.0. Non avendo un ambiente di simulazione specifico, abbiamo effettuato delle simulazioni che abbiano una valenza generale per gli ambienti indoor. Il simulatore LTE mette a disposizione dei modelli di canale, questi sono espressi come profili potenza media nel dominio del ritardo. Ogni valore di potenza è associato ad un cammino che avrà un suo specifico ritardo. Questi modelli di canale caratterizzano sommariamente l'ambiente di propagazione scelto. Nel nostro caso abbiamo introdotto nel simulatore LTE un modello di canale preso da un documento dell'ITU-R "International Telecommunication Union Radiocommunications sector" [6]. In figura 4.3 viene mostrato tale

modello, sono considerati 6 campioni di potenza associati ai ritardi relativi.

Tap	Indoor Office	
	ritardo relativo (ns)	potenza media (dB)
1	0	0
2	50	-3.0
3	110	-10.0
4	170	-18.0
5	290	-26.0
6	310	-32.0

**Figura 4.3 : ITU-R Power-delay profile indoor office**

#### **4.5.1.2 Sbilanciamento matrici di canale**

Il simulatore LTE permette di fare simulazioni su sistemi MIMO di ordine 4x4, e non di ordine superiore, questo vincolo è imposto dallo standard LTE. I sistemi MIMO simulati purtroppo non sono DAS ma le antenne dell'apparato trasmittente sono co-located come quelle del terminale mobile. Quindi le potenze che il terminale mobile riceve da ogni ramo del sistema MIMO, sono da considerarsi approssimativamente bilanciate, al massimo lo sbilanciamento è dell'ordine di qualche dB. La correzione che abbiamo attuato consiste nel modificare le varie realizzazioni della matrice di canale, andando a sbilanciare il ramo che fornisce il valor medio di potenza minore. Praticamente, il valore di potenza medio associato al ramo più debole, viene diviso per il valore di sbilanciamento voluto. Se si vuole sbilanciare un secondo ramo, si prenderà il secondo valor medio di potenza minore ricevuta e lo si dividerà a sua volta per il valore di sbilanciamento scelto. Le molteplici realizzazioni della matrice di

canale rispecchieranno gli sbilanciamenti effettuati sui rami del sistema. In questo modo riusciamo ad ingannare il simulatore facendogli credere di simulare un sistema che ai fini pratici risulta essere distribuito.

#### 4.5.1.3 Parametri di simulazione

Mostriamo in figura 4.4 la tabella contenente i parametri utilizzati nelle simulazioni.

Number of TX antennas	2/4
Number of RX antennas	2/3/4
LTE MIMO mode	Down link Single User MIMO
LTE transmit mode	4 (Closed loop spatial multiplexing)
UE Speed	0 m/sec
Channel bandwidth	20 MHz
Rx Noise Figure	3 dB
Uplink delay	0 TTI
Fading type	Block fading
Number of TTI	25/100
MAC Scheduler	Dynamic, Best CQI RB assignment

**Figura 4.4: parametri delle simulazioni LTE**

I parametri rimangono quelli utilizzati nelle simulazioni del capitolo quarto, in questo caso però, compiremo più simulazioni con sistemi di diverso ordine. Il simulatore LTE permette di settare il numero di antenne in trasmissione ed in ricezione a seconda del sistema che si vuole simulare. Il numero di TTI utilizzato verrà specificato in seguito quando andremo a valutare le singole simulazioni, impostando un numero elevato di TTI si genereranno delle simulazioni più attendibili. Le simulazioni di sistema vengono effettuate per un determinato valore di SNR complessivo, quindi andremo a valutare le prestazioni di sistema a diversi valori di SNR. Il nostro scopo è di osservare come

varia il throughput in funzione dello sbilanciamento di uno o più rami del sistema, i valori ottenuti saranno presentati in un grafico bidimensionale analogo al quello di figura 4.2 che mostra il valore di throughput in funzione del SNR e dell'imbalance. Maggiore sarà il passo di campionamento nei valori di SNR e di sbilanciamento più precise saranno le indicazioni che otterremo dai grafici.

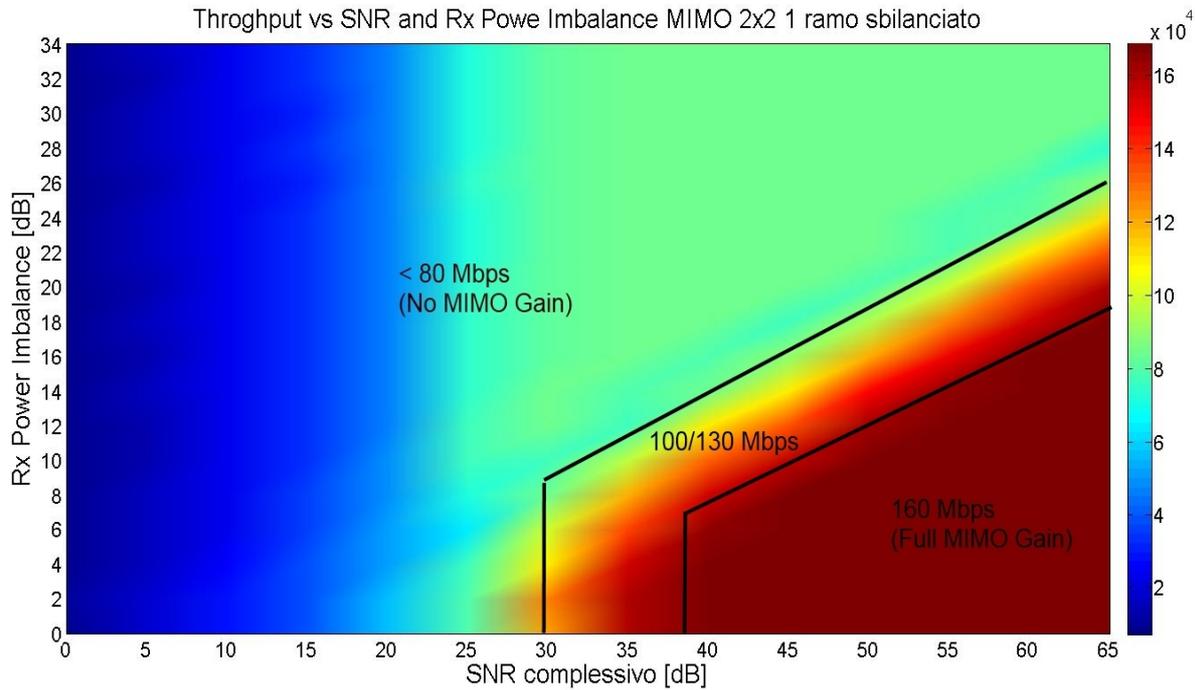
## **4.5.2 Simulazioni effettuate**

### **4.5.2.1 MIMO 2x2 1 ramo sbilanciato**

Abbiamo voluto effettuare la simulazione del sistema MIMO 2x2 per avere la conferma del comportamento del throughput in funzione del SNR e dello sbilanciamento. La simulazione in questione è stata eseguita con un valore di TTI pari a 100 in modo da considerare un numero abbastanza alto di realizzazioni di canale. I valori di SNR complessivo simulati vanno da 0 a 65 dB con un passo di campionamento di 5 dB. Abbiamo valutato il sistema in funzione dello sbilanciamento di un ramo, i valori considerati vanno da 2 a 34 dB con un passo di campionamento di 2 dB. I valori di throughput ottenuti sono stati graficati in un plot bidimensionale in funzione del SNR complessivo e dello sbilanciamento di un ramo del sistema. In figura 4.5 mostriamo il grafico appena descritto. Il comportamento ottenuto è simile a quello mostrato nella figura 4.2 del capitolo 4. Il valore di SNR complessivo da garantire perché il sistema funzioni è di 30 dB sopra la soglia di rumore, questo risultato coincide con quello che avevamo visto in precedenza. Possiamo vedere però che lo sbilanciamento incide in maniera più forte sul guadagno del sistema. Infatti per valori di SNR pari a 30 dB lo sbilanciamento non deve

superare i 10 dB altrimenti si ha che le prestazioni del MIMO si riducono a quelle di uno SISO. Possiamo deputare il funzionamento del sistema ai flussi dati generati dal multiplexing e appartenenti alle due coppie di Tx-Rx. I vari colori del grafico indicano come i flussi relativi alle coppie Tx-Rx contribuiscano al throughput. Nella zona blu il sistema non riceve un'energia sufficiente a garantire la comunicazione. La zona azzurra indica che lo flusso dati associato al ramo sbilanciato non porta alcun vantaggio al sistema e si ha un throughput paragonabile a quello di un sistema SISO. Nella zona gialla si ha che il flusso dati associato al ramo sbilanciato porta un contributo che non raggiunge la sua capacità massima, da questo punto poi si iniziano a sentire i benefici del MIMO. Nella zona rossa scura entrambi i flussi dati raggiungono la capacità massima e il valore di throughput raggiunge i 160 Mbps che rappresenta il guadagno massimo del sistema MIMO 2x2. Nel grafico in figura 4.2, il valore massimo di throughput raggiunto era di 147 Mbps (Megabit per second) mentre ora raggiungiamo un valore più elevato, questo è da imputare ai miglioramenti che ha ricevuto il simulatore LTE rispetto al caso precedentemente simulato. Facendo sempre riferimento al grafico 4.2, possiamo dire che i valori di throughput ottenuti nella simulazione del grafico 4.5 subiscono un peggioramento più evidente a parità di sbilanciamento. Infatti la retta obliqua ha un inclinazione che è circa la metà della retta del grafico di riferimento. Da questo avremo che il valore da attribuire alla soglia di funzionamento  $k$  di formula 4.6, sarà minore di 15 dB. Le differenze viste sono imputabili al modello di canale utilizzato e al

miglioramento del sistema di simulazione LTE adottato.

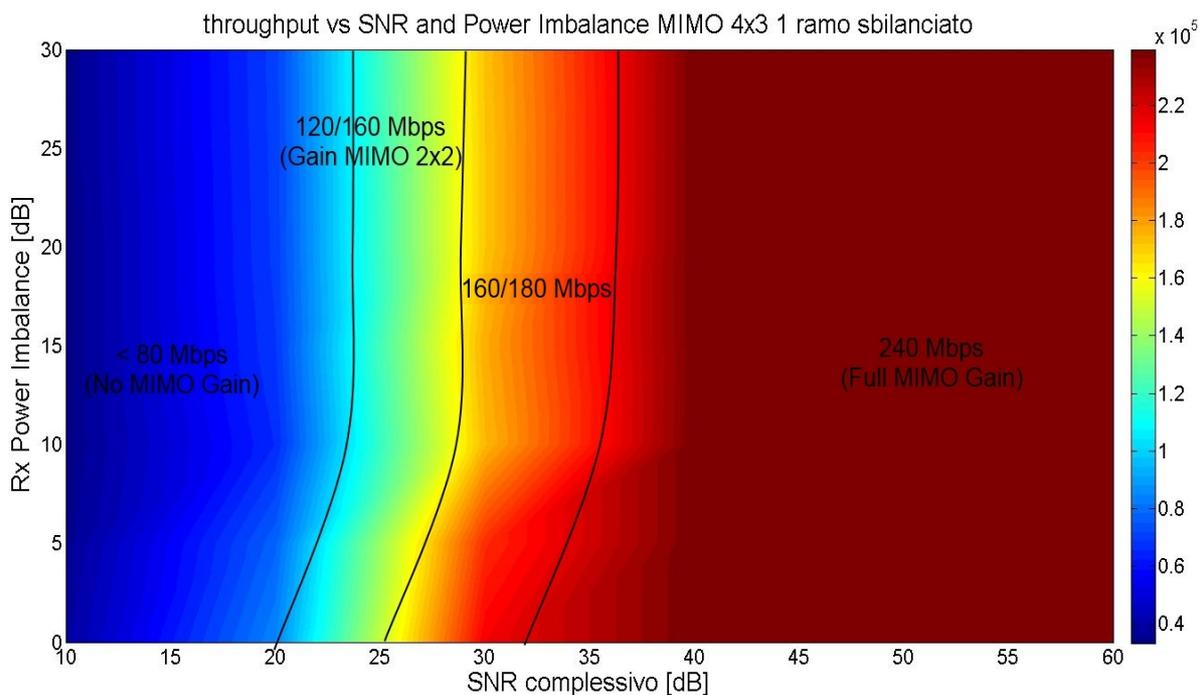


**Figura 4.5: Throughput MIMO 2x2 vs SNR and RX Power Imbalance**

#### 4.5.2.2 MIMO 4x3 1 ramo sbilanciato

Abbiamo considerato il sistema MIMO 4x3 che utilizza 4 antenne in trasmissione e solo 3 in ricezione, ed abbiamo sbilanciato il ramo che in media riceve il SNR minore. Il valore di TTI utilizzati è pari a 25, purtroppo non è molto elevato, ma in questo modo si velocizzano le simulazioni perché si riduce il numero di realizzazioni delle matrici di canale. I valori di SNR complessivo simulati vanno da 10 a 60 dB con un passo di campionamento di 10 dB. Abbiamo valutato il sistema in funzione dello sbilanciamento di un ramo, i valori considerati vanno da 0 a 30 dB con un passo di campionamento di 5 dB. Le coppie di Tx-Rx sono tre quindi il throughput che ci aspettiamo è quello di un sistema MIMO 3x3. Di fatto le antenne trasmettenti che lavoreranno

in multiplexing con le rispettive antenne in ricezione sono 3, mentre l'antenna spaiata contribuirà ad aumentare il SNR complessivo del sistema lavorando in diversità. In figura 4.6 mostriamo i valori di throughput in funzione del SNR complessivo e dello sbilanciamento di un ramo del sistema.



**Figura 4.6: Throughput MIMO 4x3 vs SNR and RX Power Imbalance**

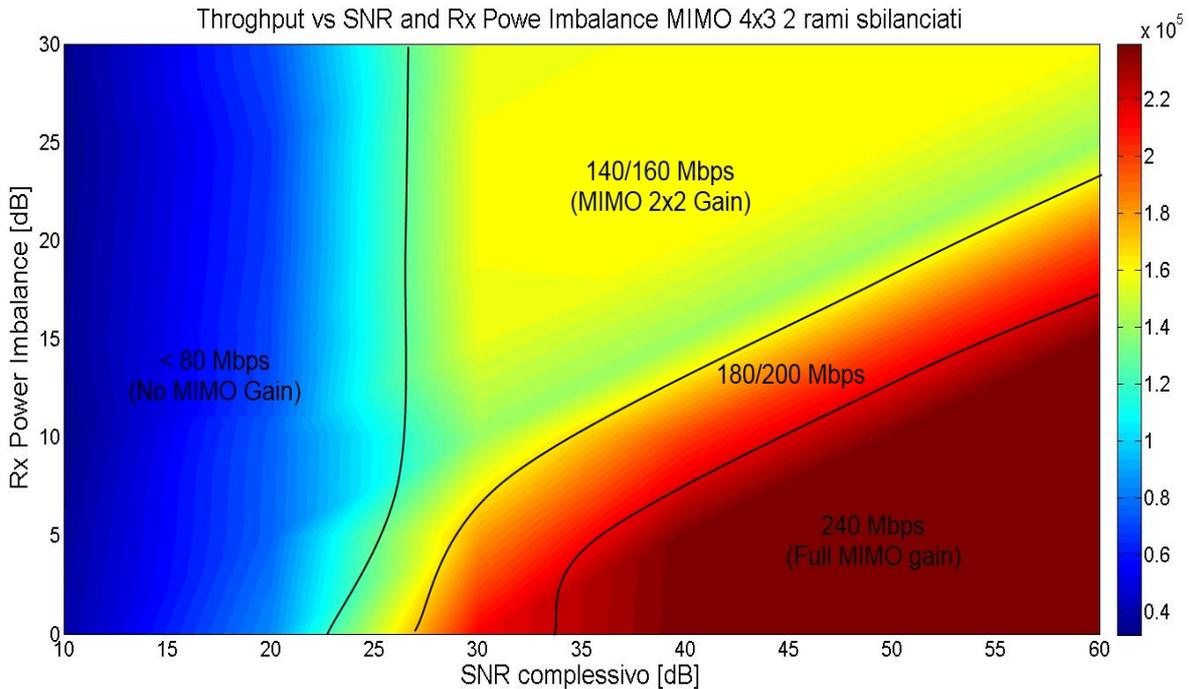
Come possiamo vedere dalla figura sopra per valori di SNR compresi tra 25 e 30 dB il sistema funziona come se avessimo solo 2 antenne in trasmissione perchè il throughput coincide con quello di un MIMO 2x2. Se ci poniamo a 30 dB di SNR complessivo e consideriamo uno sbilanciamento inferiore a 10 dB il sistema si avvicina al valore massimo di guadagno di un sistema MIMO 3x3. Aumentando lo sbilanciamento oltre i 10 dB serve un valore leggermente maggiore di SNR, circa 35 dB per raggiungere il guadagno di un sistema MIMO

3x3. Se ci poniamo a SNR superiori ai 35 dB, si ha che per valori alti di sbilanciamento il throughput rimane costante, ciò accade perché avendo solo tre coppie di antenne, la perdita dell'unica antenna spaiata non riduce le prestazioni del sistema.

#### **4.5.2.3 MIMO 4x3 2 rami sbilanciati**

Abbiamo considerato il sistema MIMO 4x3 che utilizza 4 antenne in trasmissione e solo 3 in ricezione, ed abbiamo sbilanciato alla stessa maniera i due rami che in media ricevono il SNR minore. Il valore di TTI utilizzati è pari a 25, purtroppo non è molto elevato, ma in questo modo si velocizzano le simulazioni, la causa è la riduzione del numero di realizzazioni delle matrici di canale. I valori di SNR complessivo simulati vanno da 10 a 60 dB con un passo di campionamento di 10 dB mentre i valori di sbilanciamento per i due rami vanno da 0 a 30 dB con un passo di 5 dB. Anche in questo caso le coppie di Tx-Rx sono tre, quindi il throughput atteso è quello di un sistema MIMO 3x3. In figura 4.7 mostriamo i valori di throughput in funzione del SNR complessivo e dello sbilanciamento di due rami del sistema considerato. Come si può vedere al di sotto dei 25 dB di SNR il non vi è guadagno utilizzando il MIMO. La zona gialla è quella in cui il valore di throughput raggiunto è quello del sistema MIMO 2x2, a 30 dB di SNR con uno sbilanciamento superiore a 10 dB si ricade nella zona appena indicata. La zona rosso chiara indica che ci stiamo avvicinando al funzionamento ottimale, di fatto siamo leggermente sotto ai valori massimi di throughput che dovremmo raggiungere con un MIMO 3x3. Oltre i 35 dB di SNR e per sbilanciamenti ragionevoli ricadiamo nella fascia rosso scura in cui si raggiunge il throughput

massimo associabile ad un sistema MIMO 3x3. Vista la linearità delle linee righe nere che delimitano la zona rossa di throughput possiamo dire che è possibile definire per questo grafico, quindi per il sistema considerato, una soglia di funzionamento  $k$  del ramo.

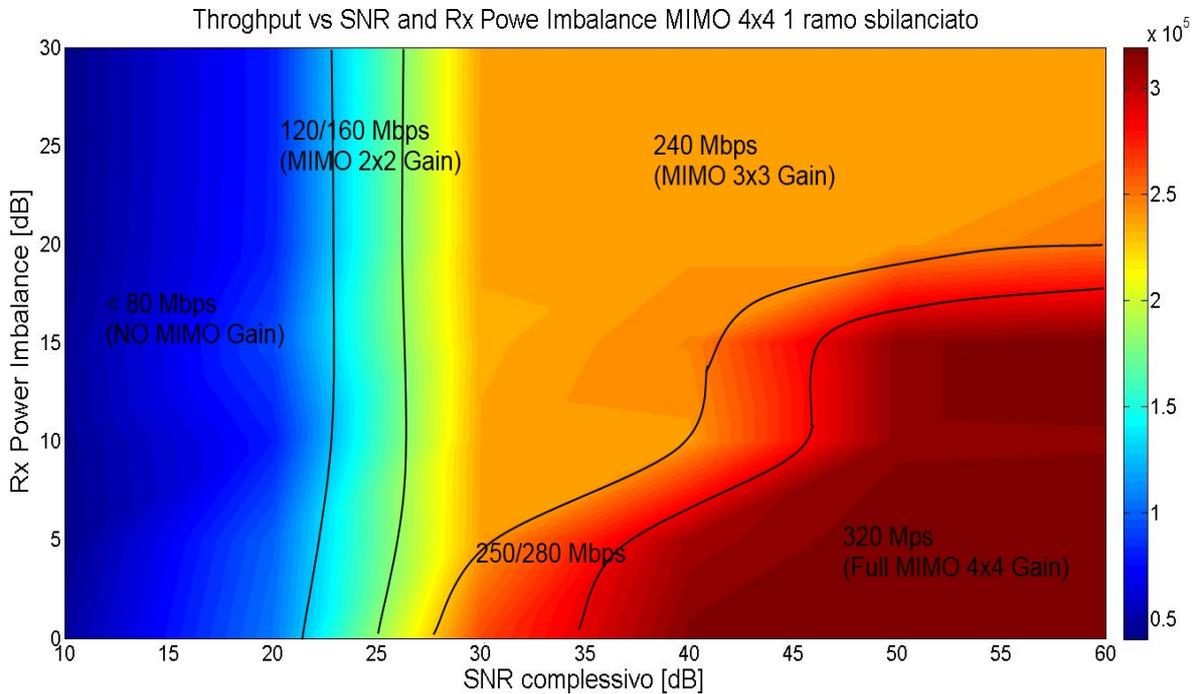


**figura 4.7: Throughput MIMO 4x3 vs SNR and RX Power Imbalance (2 rami sbilanciati)**

#### 4.5.2.4 MIMO 4x4 1 ramo sbilanciato

Abbiamo considerato il sistema MIMO 4x4 che utilizza 4 antenne in trasmissione e 4 in ricezione, siamo andati a sbilanciare il ramo che in media riceve il SNR minore. Il valore di TTI utilizzati è pari a 25, purtroppo non è molto elevato, ma in questo modo si velocizzano le simulazioni. I valori di SNR complessivo simulati vanno da 10 a 60 dB con un passo di campionamento di 10 dB. Abbiamo valutato il sistema in funzione dello sbilanciamento di un ramo, i valori considerati vanno da 0 a 30 dB con un passo di campionamento di 5

dB. In figura 4.8 mostriamo i valori di throughput in funzione del SNR complessivo e dello sbilanciamento di un ramo del sistema.



**figura 4.8: Throughput MIMO 4x4 vs SNR and RX Power Imbalance**

Il grafico in figura mostra diverse zone di throughput, nella zona blu scura non abbiamo energia sufficiente per il funzionamento del sistema. La zona azzurra compresa tra i 22 e i 25 dB di SNR mostra un throughput pari a quello di un sistema MIMO 2x2. La zona arancione raggiunge il throughput di un sistema MIMO 3x3, come possiamo notare questa è molto estesa, perché lo sbilanciamento di un ramo ci porta ad ottenere solo 3 connessioni in multiplexing. Da SNR di 30 dB in su, con uno sbilanciamento non troppo elevato si raggiungono throughput associabili ad un sistema MIMO 4x4. Nella zona rosso scura il sistema permette di raggiungere velocità di trasferimento pari a 320 Mbps. Per questa simulazione è difficile definire una soglia  $k$  di

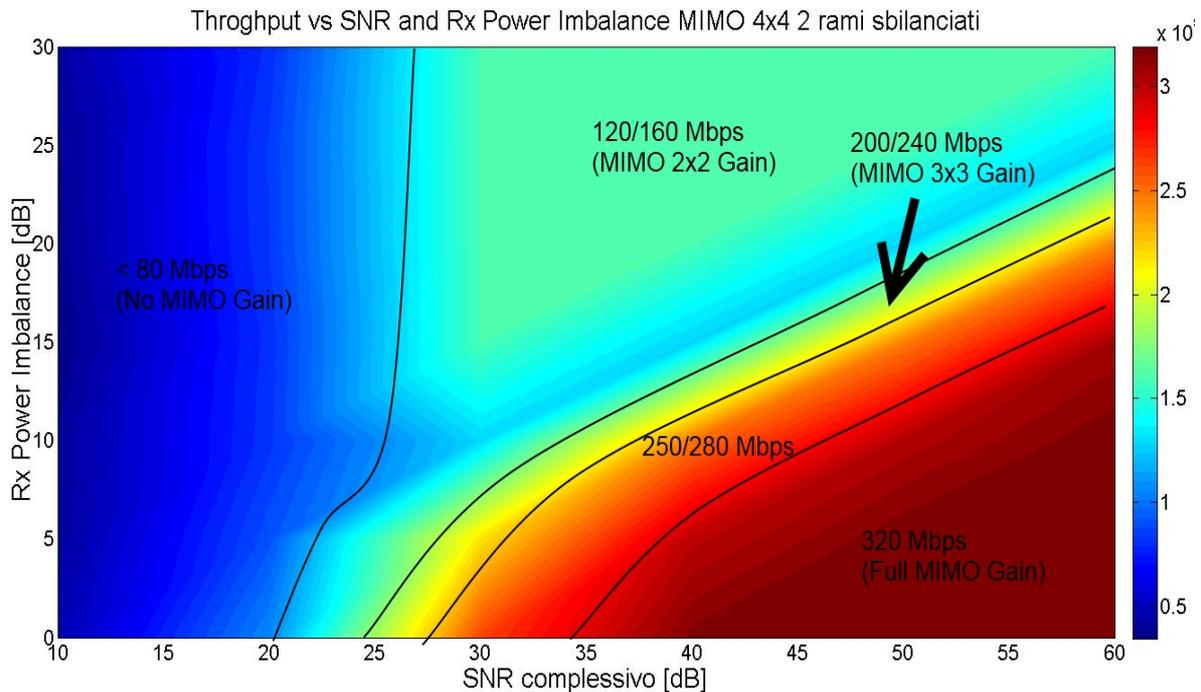
funzionamento del ramo che vada bene per tutti i valori di SNR, questo perché il comportamento del throughput del grafico non è lineare al aumentare del SNR complessivo.

Per ottenere risultati più attendibili dovremmo fare riferimento a grafici con un campionamento maggiore di SNR e di sbilanciamento. Possiamo concludere dicendo che ogni collegamento in multiplexing se sfruttato al massimo delle capacità permette di aggiungere 80 Mbps al throughput.

#### **4.5.2.5 MIMO 4x4 2 rami sbilanciati**

Abbiamo considerato il sistema MIMO 4x4 che utilizza 4 antenne in trasmissione e 4 in ricezione, ed abbiamo sbilanciato alla stessa maniera i due rami che in media ricevono il SNR minore. Il valore di TTI utilizzati è pari a 25, purtroppo non è molto elevato, ma in questo modo si velocizzano le simulazioni. I valori di SNR complessivo simulati vanno da 10 a 60 dB con un passo di campionamento di 10 dB. Abbiamo valutato il sistema in funzione dello sbilanciamento di un ramo, i valori considerati vanno da 0 a 30 dB con un passo di campionamento di 5 dB. In figura 4.9 mostriamo i valori di throughput in funzione del SNR complessivo e dello sbilanciamento di un ramo del sistema. Il grafico è suddiviso per colori nella zona blu il sistema MIMO non ha energia sufficiente per funzionare e il throughput raggiunto è quello di un sistema SISO. A 30 dB di SNR e per valori di imbalance inferiori a 10 dB si raggiungono prestazioni di poco superiori a quelle di un MIMO 3x3. Per SNR superiori a 30 dB e rimanendo a valori di imbalance che ci fanno ricadere nella zona rossa otteniamo un throughput che si avvicina alle prestazioni massime. Al

contrario se i valori di sbilanciamento sono molto alti, oltre i 20 dB, il guadagno di sistema ottenuto è quello di un MIMO 2x2. Questo è quello che aspettavamo di trovarci dato che l'imbalance riduce la potenza di 2 rami su 4. Anche in questo caso per avere dati più attendibili si dovrebbero effettuare le simulazioni con passi di campionamento dei valori di SNR e di sbilanciamento più raffinati.



**figura 4.8: Throughput MIMO 4x4 vs SNR and RX Power Imbalance (2 rami sbilanciati)**

Possiamo notare che il comportamento del throughput indicato dalle linee nere di separazione delle varie zone, è lineare. Anche in questo caso possiamo determinare una soglia  $k$  di funzionamento del ramo che è valida per tutti i valori di SNR superiori a 30 dB, a cui il sistema MIMO funziona.

## Capitolo 5 Planning di i-MIMO DAS di ordine qualsiasi

### 5.1 Caso Lineare

#### 5.1.1 Pianificazione

In primo luogo si è deciso di effettuare una pianificazione di tipo lineare in cui tutti gli  $n$  rami sono allineati in direzione  $x$ . Il caso lineare è di più semplice implementazione rispetto a quello bidimensionale ma comunque utile nella comprensione del problema di copertura. La pianificazione lineare può rappresentare il caso di un corridoio molto lungo. Al fine di realizzare una struttura chiusa, il set completo dei rami viene ripetuto 7 volte, nel caso si consideri un sistema lineare DAS MIMO composto da 3 RAU, la posizione delle antenne può essere così rappresentata A-B-C-A-B-C-A-B-C-A-B-C.... Il ricevitore viene mosso lungo la ripetizione centrale, la struttura infatti è ripetuta 7 volte in modo da avere lo stesso numero di ripetizioni sia a destra che a sinistra del tratto di sondaggio del ricevitore. Le antenne trasmettenti sono poste ad un'altezza di 3 metri, mentre la linea di ricezione è posta ad un'altezza di 1,5 metri. La situazione da ipotizzata è quella di avere le RAU situate al livello del soffitto, e la linea di ricezione posta ad altezza uomo. Per ciascuna posizione del Rx si suppone che esso sia collegato a tutti i rami presenti, tutte le antenne trasmettenti sono supposte isotrope. È da mettere in evidenza il fatto che la valutazione è limitata ad una sola antenna in ricezione, perché si utilizzano modelli di propagazione che stimano esclusivamente il path loss in funzione della distanza. Per tale motivo avremo che i diversi elementi dell'antenna ricevente spaziatosi di frazioni di  $\lambda$  risulterebbero "indistinguibili". Perciò se

avessimo più antenne in ricezione, sentiremo la stessa potenza per tutte indistintamente a meno di frazioni di dB; per le ipotesi da noi considerate non avrebbe alcun senso effettuare lo studio con un apparato ricevente composto da più antenne. Nel codice matlab è stato utilizzato un modello di propagazione che tiene conto dell'attenuazione di spazio libero più un'aggiuntiva attenuazione dovuta alla propagazione indoor che è caratterizzata dalla presenza di ostacoli che attenuano maggiormente il segnale. L'attenuazione è stata calcolata con la formula (5.1.0), che se pur non essendo del tutto rigorosa può essere ugualmente utilizzata. Tale formula è rigorosamente valida se si considera un fattore di attenuazione  $\alpha=2$  pari a quello di spazio libero, mentre  $\beta$  rappresenta l'attenuazione aggiuntiva della propagazione indoor. Per valori di  $\alpha$  di poco diversi a 2 tale formula si può ancora ritenere ancora valida.

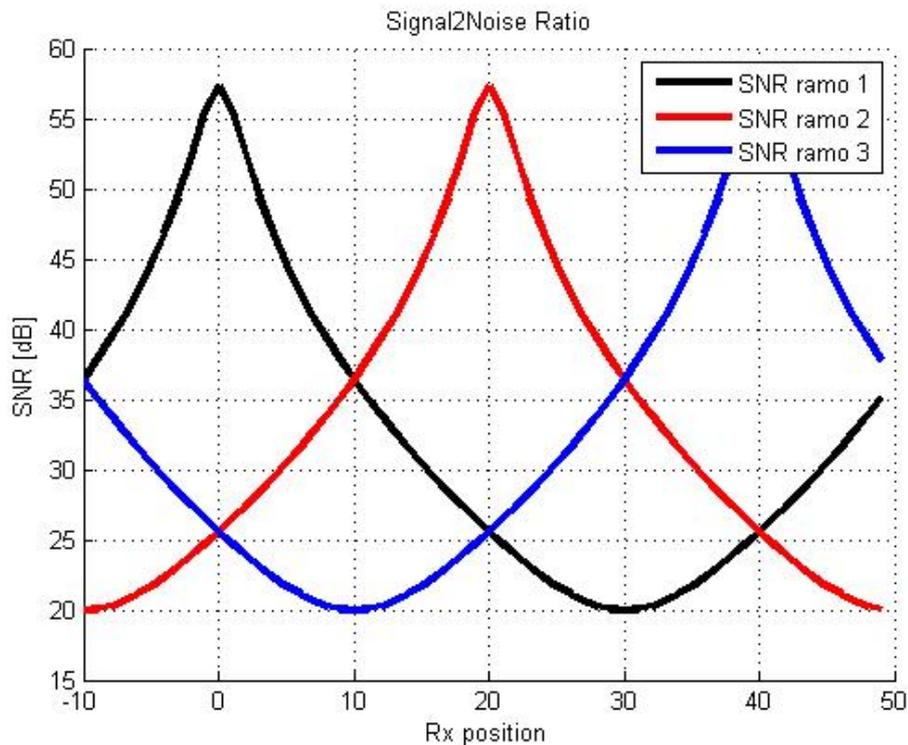
$$Loss_{dB}=20\log_{10}(4\pi/\lambda)+10\alpha\log_{10}(d)+\beta d \quad (5.1.0)$$

In base a quanto spiegato nel capitolo 3 riguardante la pianificazione di un sistema DAS MIMO 2X2, si è definita la condizione che il SNR del sistema deve essere superiore di 30 dB rispetto alla soglia di rumore, per uno scenario indoor un valore plausibile di soglia di rumore è di -100 dBm. Quindi la soglia di funzionamento sarà di  $-100+30 = -70$  dBm. Considerando il modello di propagazione di formula 5.1.0 è possibile verificare che per una distanza di 20 metri e per un valore minimo di potenza ricevuta pari a -70 dBm, si ottengono potenze in trasmissione dell'ordine dei milliwatt. Nelle trasmissioni indoor le potenze utilizzate sono appunto dell'ordine dei milliwatt.

Quindi per essere sicuri di avere una copertura uniforme si è preso come distanza fra le RAU, 20 metri che risulta essere una distanza ragionevole. Il programma di pianificazione lineare permette di impostare il numero di antenne del sistema i-MIMO . É possibile anche gestire la potenza di trasmissione delle antenne, che sarà la stessa per tutte le RAU.

### 5.1.2 Profili di rapporto segnale rumore

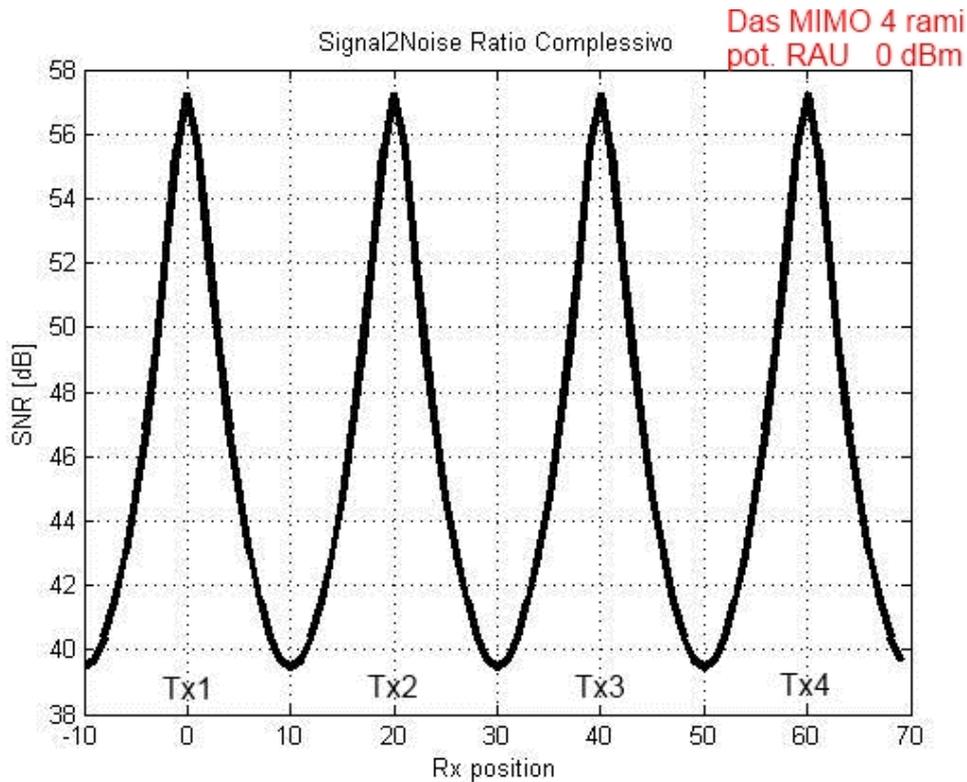
Grazie al programma di pianificazione lineare si possono graficare le potenze ricevute lungo il percorso fatto dal ricevitore. Per un sistema DAS MIMO di ordine qualsiasi, è possibile ricavare il grafico del SNR. Se si considera un sistema a 3 rami con una potenza di trasmissione delle RAU di 0 dBm, si ricavano i profili in figura 5.0.



**Figura 5.0: SNR rami i-MIMO DAS lineare 3 rami**

Il SNR del singolo ramo è stato fatto considerando la potenza

proveniente da tutte le RAU associate a quel determinato ramo MIMO, ad ogni contributo in potenza dato dalla singola RAU viene sottratto il rumore di fondo. Se si considera la somma dei SNR proveniente da tutte le ripetizioni dei rami del sistema si ottiene il SNR complessivo. In figura 5.1 è raffigurato il SNR complessivo di un sistema MIMO DAS a 4 rami.



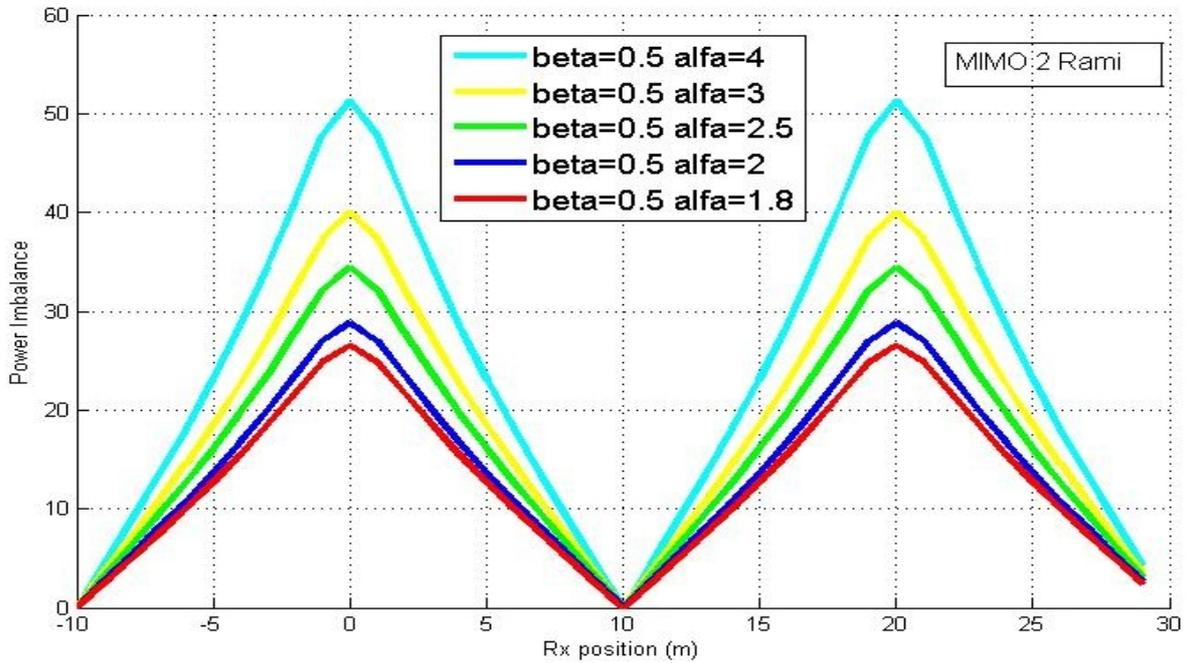
**Figura 5.1: SNR complessivo i-MIMO DAS 4 rami**

Nel grafico sopra riportato è stata considerata una potenza di trasmissione delle RAU di 0 dBm; si può notare che per tale potenza di trasmissione i valori di SNR complessivo sono buoni, infatti non scendono mai al di sotto dei 30 dB, che rappresentano la soglia di funzionamento del sistema. Il SNR ha i suoi massimi quando il ricevitore si trova in corrispondenza delle RAU.

### 5.1.3 Power Imbalance

Il power imbalance rappresenta la differenza in dB tra le potenze provenienti da due diversi rami MIMO, dove la potenza di un ramo MIMO è data dalla somma in lineare delle potenze ricevute da tutte le antenne omonime che sono ripetute più volte nella pianificazione lineare. Il power imbalance è espresso in decibel e viene calcolato per ogni punto di sondaggio del ricevitore. Tale parametro già esaminato in precedenza è stato dimostrato essere molto utile per la comprensione della bontà del canale di trasmissione. L'imbalance non dipende dall'intensità delle potenze ricevute né da quella trasmessa dalle RAU, ma dallo sbilanciamento delle potenze ricevute dai diversi rami MIMO; si può facilmente dimostrare che i valori di imbalance cambiano al variare dei parametri  $\alpha$  e  $\beta$  del modello di propagazione. Nella figura 5.2 sono messi a confronto i power imbalances con  $\beta$  fisso e  $\alpha$  variabile; si può vedere che per  $\alpha$  crescenti il valore di imbalance cresce, questo perché l'attenuazione non essendo lineare si fa maggiormente sentire sull'antenna posta a distanza maggiore dal punto di ricezione. Il parametro  $\beta$  rimane fisso al valore 0.5 dB/m perché rappresenta l'attenuazione concentrata attribuita allo scenario indoor, questo significa che si perdono 0.5 dB per ogni metro che separa trasmettitore dal ricevitore. Il parametro  $\beta$  utilizzato è stato determinato dalle misure fatte in ambiente ufficio Andrew con pareti di carton gesso[7]. L'attenuazione supplementare è attribuibile alla presenza di ostacoli presenti all'interno degli scenari indoor. Dalla figura 5.2 si può notare che i picchi della funzione sono due, e sono localizzati esattamente nei punti in cui si trovano le due antenne, a 0 m

e a 20 m. Si ha un picco quando si è esattamente sotto alla RAU e si sente il massimo valore di potenza ricevuto da quell'antenna.



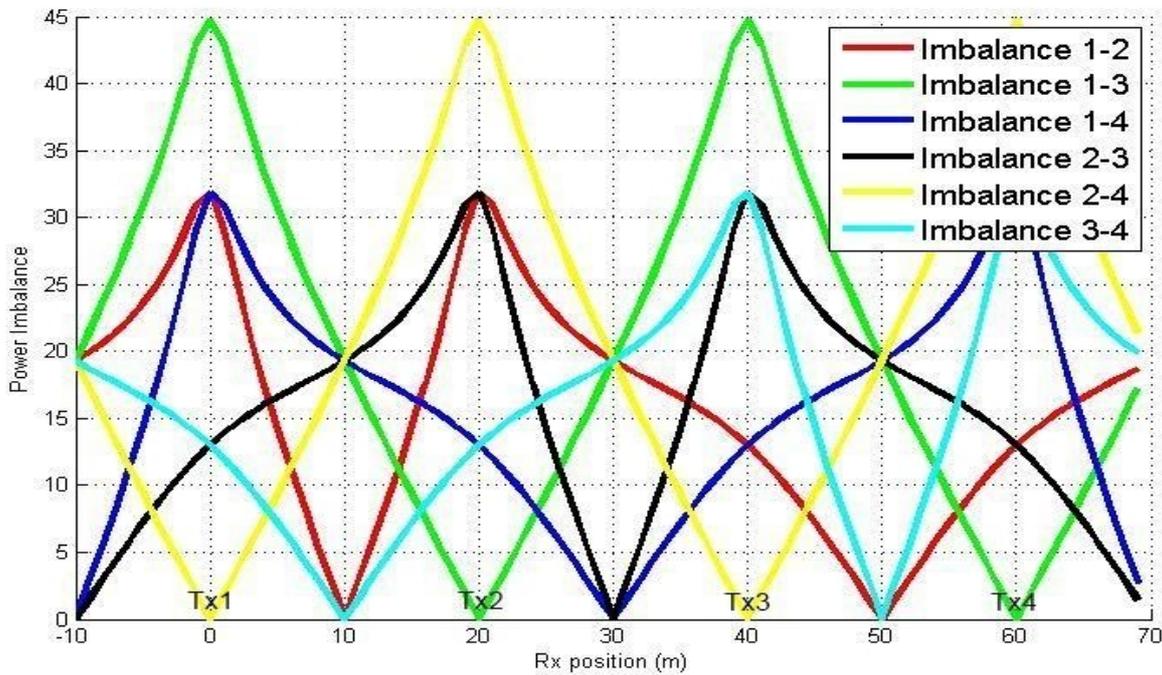
**Figura 5.2: Imbalance i-MIMO 2 rami**

Per un sistema MIMO a più antenne, si generano più imbalance differenti, perché ci sono più possibili coppie di antenne Tx-Rx. Se  $n$  è il numero di antenne del sistema i-MIMO DAS allora il numero di imbalance possibili è dato dal coefficiente binomiale, con  $k$  pari a 2

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$$

Per un sistema MIMO DAS lineare con 4 antenne il power imbalance è mostrato in figura 5.3, si può vedere che il numero di coppie di antenne è pari a 6 e che corrisponde con il numero di imbalance. Le 4 RAU sono poste a distanza di 20 m a partire dalla prima che è posta all'ascissa 0. Se si considera l'imbalance fra le RAU 1 e 2 questo si annulla esattamente nei punti di simmetria, che sono quelli posti alla

stessa distanza da entrambe le RAU; questo vale per ogni coppia di antenne considerate.



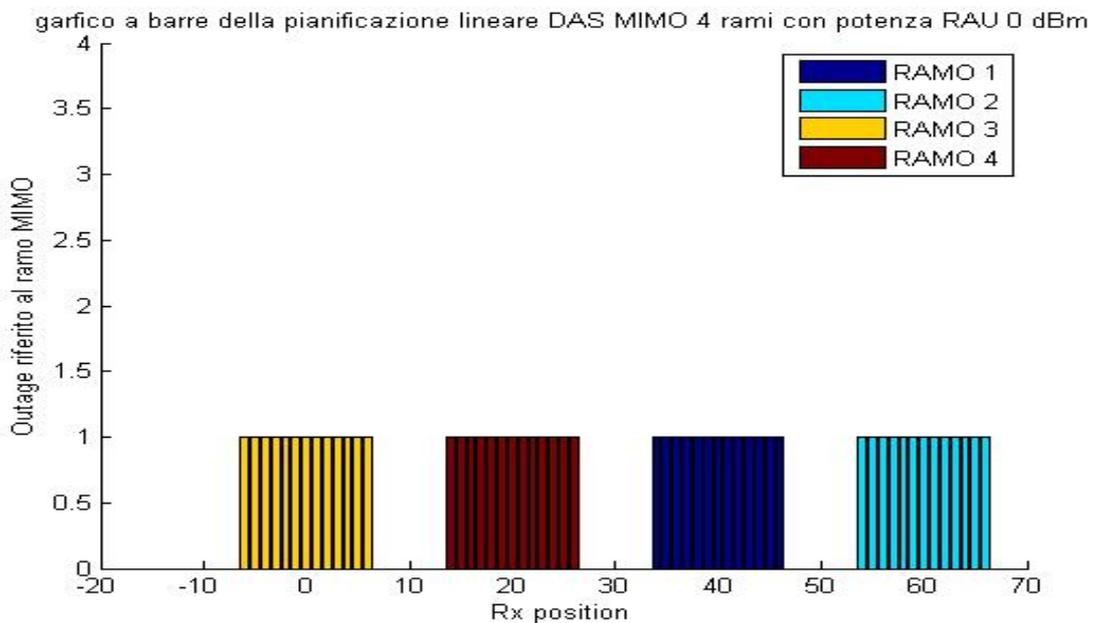
**Figura 5.3: Imbalance i-MIMO DAS 6 rami**

### 5.1.5 Valutazione sul numero medio di rami utili e inutili

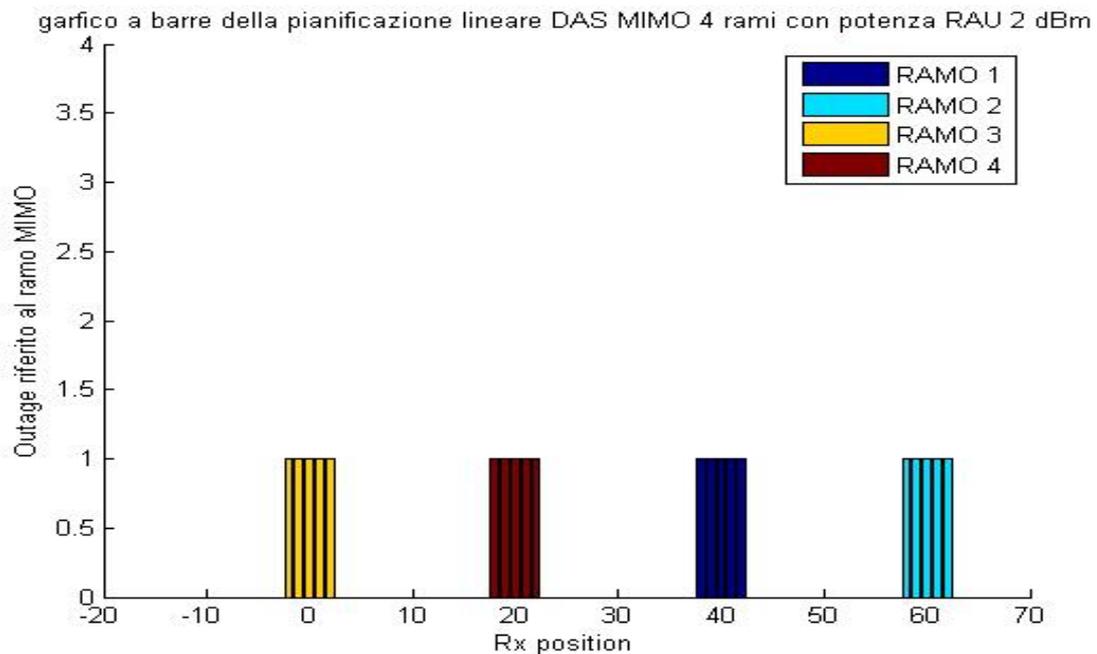
Le condizioni ottenute nel paragrafo precedente mi permettono di valutare la validità della pianificazione fatta. Il primo vincolo afferma che il SNR complessivo del sistema non deve essere al di sotto della soglia dei 30 dB, se ciò accade non sappiamo prevedere il comportamento del sistema, ma i valori di throughput raggiungibili sono molto inferiori rispetto alle reali capacità. Il secondo vincolo mi dà un'indicazione della presenza di rami che non danno un buon contributo al SNR complessivo; tali rami sono da considerarsi deboli. Quando il SNR ricevuto da un ramo è inferiore alla soglia dei 15 dB non sappiamo prevedere il reale contributo che quest'ultimo apporta alla trasmissione; però possiamo dire con certezza che le capacità del

ramo non saranno sfruttate. Uno dei nostri scopi durante la pianificazione è appunto quello di evitare di impiegare un numero superiore di rami rispetto a quelli che saranno realmente utilizzati.

Nel momento in cui andremo a effettuare lo studio della progettazione di un sistema I-DAS MIMO, dobbiamo tenere in considerazione delle indicazioni date sulla presenza di rami inutili, in base a queste andremo a scegliere il numero adeguato di rami e la relativa disposizione. Gli studi fatti hanno lo scopo di fornire dei criteri su come non sprecare risorse e ottenere ottime prestazioni in termini di copertura e di throughput. In una pianificazione lineare impostato il numero di rami, e una potenza di trasmissione per le RAU, si può ottenere il grafico in figura 5.5 che mostra lungo il percorso di ricezione, quanti sono il numero di rami inutili e a che ramo appartengono.



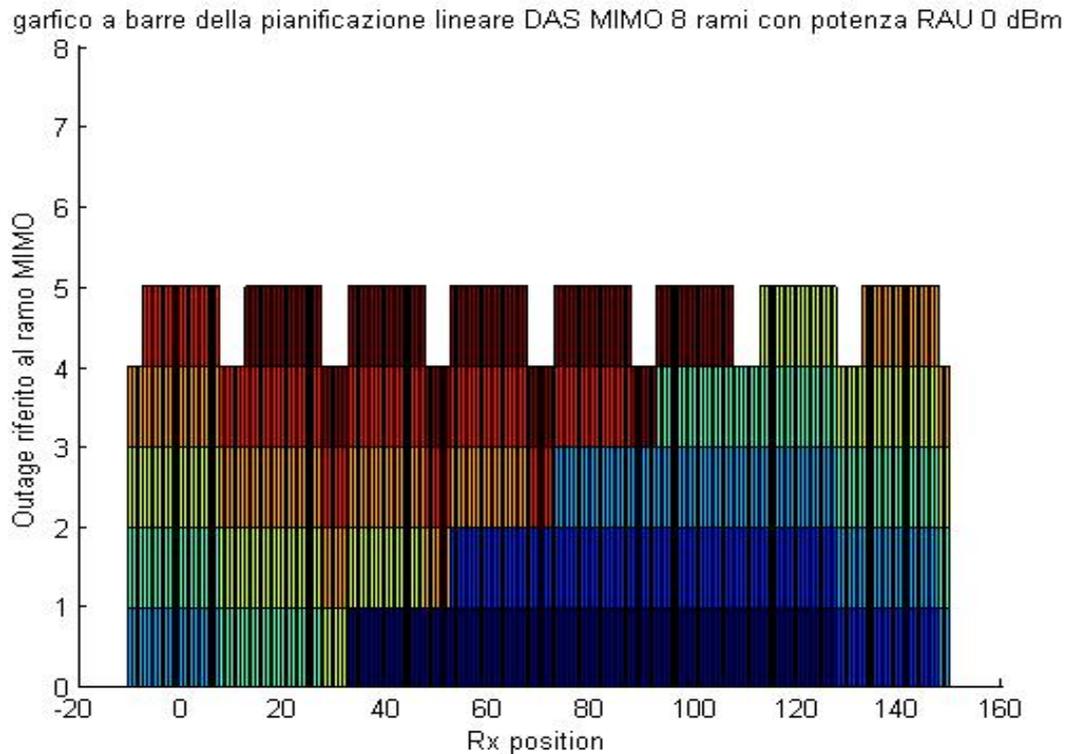
**Figura 5.5: rami inutili i-DAS MIMO lineare 4 rami a 0 dBm**



**Figura 5.6:rami inutili i-DAS MIMO lineare 4 rami a 2 dBm**

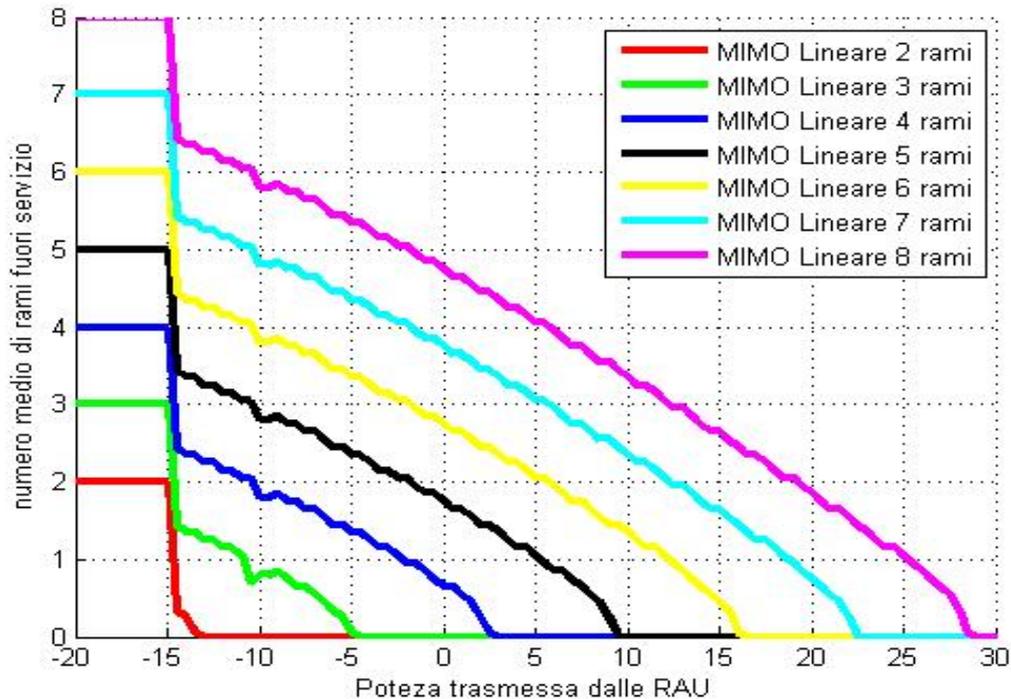
Nel grafico in figura 5.5 in ordinata abbiamo il numero di rami inutili, mentre in ascissa è rappresentato il percorso fatto dal ricevitore. Il grafico è stato ottenuto per 0 dBm di potenza trasmessa dalle RAU con una configurazione a 4 rami; si può notare che per la maggior parte del percorso di ricezione c'è un ramo inutile. In figura 5.6 viene mostrato il numero di rami inutili per una potenza di trasmissione delle RAU di 2 dBm. Si può facilmente notare rispetto al caso precedente che le posizioni in cui si ha la presenza di un ramo inutile si riducono all'aumentare della potenza in trasmissione. Se si considera un sistema i-DAS MIMO lineare a 8 rami con una potenza in trasmissione per lr RAU di 0 dBm si ottiene il grafico di figura 5.6. Si può notare che il numero di rami inutili aumenta considerevolmente, questo perché la potenza di trasmissione di 0 dBm è insufficiente a garantire un buon SNR da parte di ogni ramo al

ricevitore.



**Figura 5.6:rami inutili i-DAS MIMO lineare 8 rami a 0 dBm**

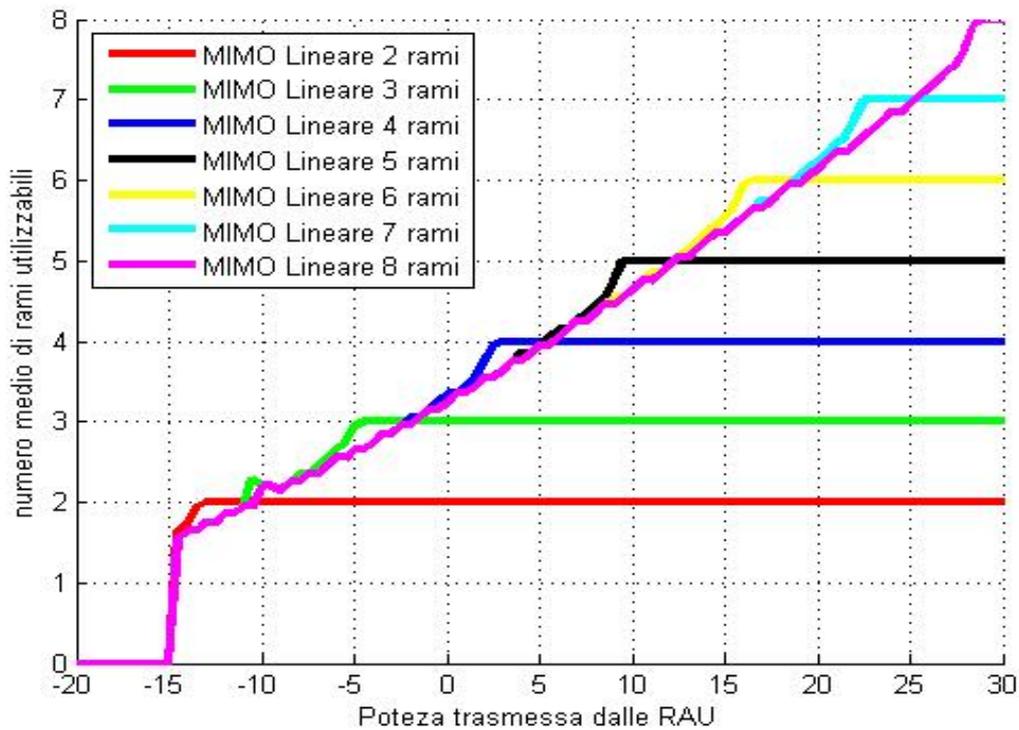
Per una pianificazione di un sistema lineare DAS MIMO a 8 rami che sfrutti la reale capacità di trasmissione, si dovrebbero utilizzare circa 30 dBm di potenza. Una potenza di 30 dBm in trasmissione supera abbondantemente i limiti imposti dalle normative ETSI "*European Telecommunications Standards Institute*" per le trasmissioni indoor. Per avere un indicazione riassuntiva del numero di rami inutili di un sistema lineare I-DAS MIMO di ordine qualsiasi, è stato implementato un programma che permette di graficare tale parametro, in funzione della potenza utilizzata in trasmissione dalle RAU. Il grafico ottenuto è mostrato in figura 5.7



**figura 5.7:numero medio rami inutili i-MIMO DAS lineare di ordine qualsiasi**

Dalla figura si può notare che tutte le curve raggiungono la saturazione al numero di rami del sistema associato, questo accade per la stessa potenza di trasmissione delle RAU, che è di circa  $-15$  dBm. A tale potenza si ha un gradino netto che porta il numero di rami inutili a saturare al valore massimo, questo perché il SNR complessivo è inferiore ai 30 dB necessari al funzionamento del sistema MIMO, per una percentuale di punti di ricezione superiore al 50 %. Man mano che aumenta l'ordine del sistema, è facile capire che si deve aumentare la potenza di trasmissione delle RAU, per ottenere il minor numero di rami fuori uso. Le oscillazioni delle curve sono dovute alle approssimazioni numeriche fatte dal calcolatore. Se invece di considerare il numero di rami utili si sceglie di graficare quelli utili

otteniamo il grafico in figura 5.8.



**figura 5.8: numero medio rami utili i-MIMO DAS lineare di ordine qualsiasi**

Da questo grafico si può facilmente risalire al numero di rami che si dovrebbero utilizzare per una pianificazione lineare DAS MIMO, fissata una potenza di trasmissione per le RAU. Per una potenza di 10 dBm, si vede che l'ordine massimo di rami raggiungibili per questo tipo di pianificazione, è pari a 5 rami. In questo modo possiamo scegliere, in base all'area in cui fornire la copertura e al throughput che vogliamo raggiungere, il numero adeguato di antenne da utilizzare, e la potenza necessaria affinché queste siano sfruttate nel miglior modo possibile.

É possibile notare che a parità di potenza trasmessa dalle RAU un sistema con un numero inferiore di antenne ha performance migliori,

in quanto a numero di rami utili, rispetto ad un sistema di ordine superiore. È sconsigliato sia in termini di costi che in termini di funzionamento utilizzare un numero di rami superiore al necessario.

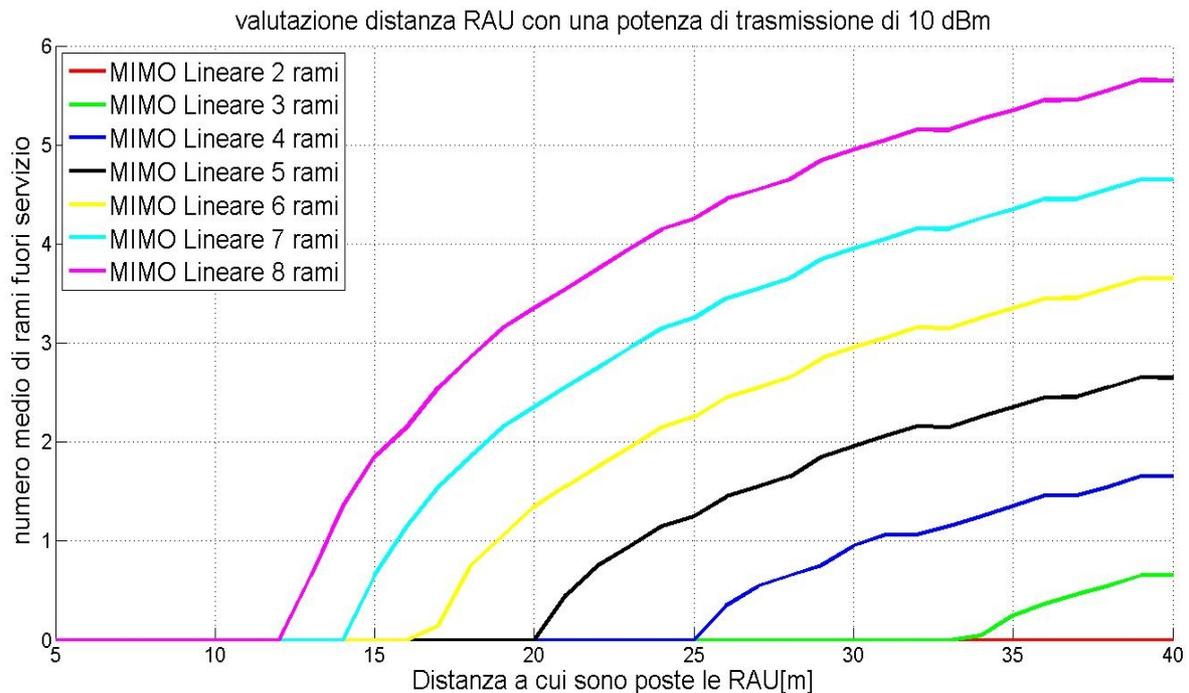
La pianificazione lineare è stato il primo passo grazie al quale, si sono potuti analizzare i sistemi lineari I-DAS MIMO di ordine qualsiasi.

Da ora in poi andremo a effettuare studi su casi bidimensionali, che risultano essere più caratteristici degli ambienti reali.

### **5.1.6 Valutazioni sulla distanza**

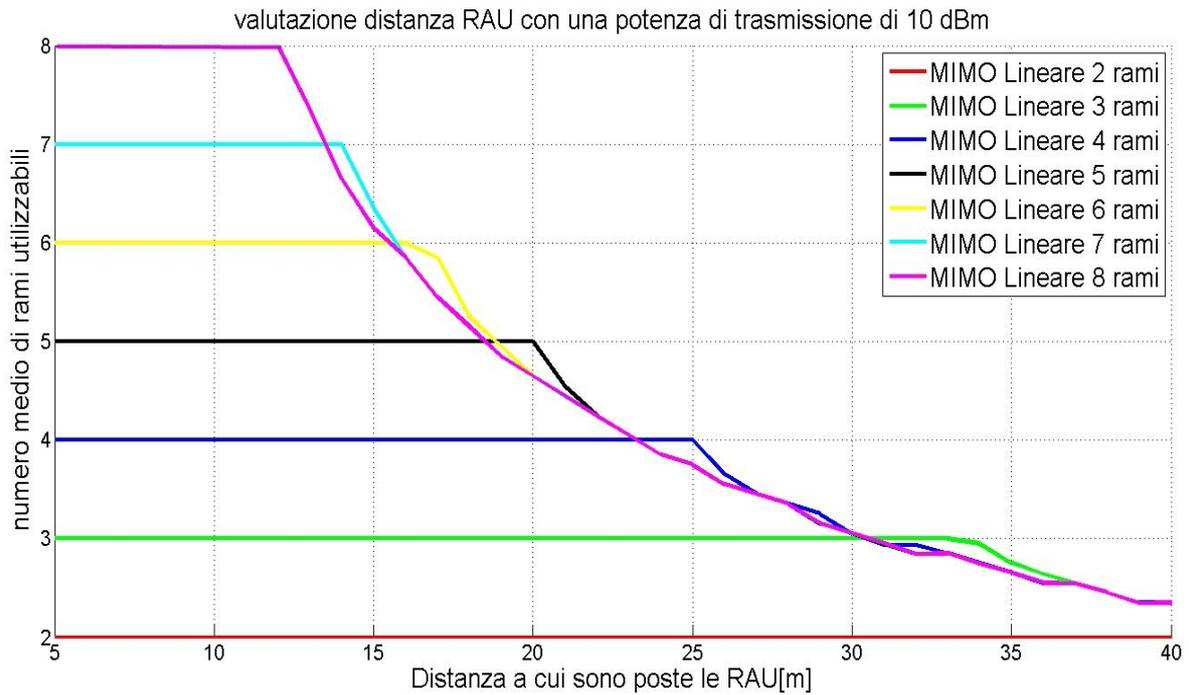
Fin ora abbiamo considerato la distanza fra le antenne remote come un parametro fisso di progetto, mentre la potenza trasmessa da esse, è stata stimata come il valore da determinare per garantire il funzionamento ottimale del sistema. Ci siamo posti di determinare la distanza a cui porre le RAU, fissata la potenza di trasmissione di ogni antenna. I grafici che andremo a esporre mostrano il valore medio di rami utili/inutili in funzione della distanza a cui sono poste le antenne remote. Le curve sono state ottenute considerando come parametri del modello di propagazione  $\alpha = 2$  e  $\beta = 0.5$ . Si è scelto di utilizzare una potenza di 10 dBm in trasmissione per ottenere i grafici seguenti, ma nessuno vieta di modificare la potenza emessa dalle RAU. In questo modo l'addetto alla pianificazione, a seconda delle esigenze, potrà regolare a suo piacimento la potenza di trasmissione, in modo da ottenere le indicazioni volute. In figura 5.9 viene mostrato il numero medio di rami fuori servizio per sistemi DAS MIMO lineari che vanno da 2 a 8 rami, tali valori sono in funzione della distanza. Si può notare che il numero di rami inutili o fuori servizio aumenta al crescere della distanza a cui poniamo le RAU. Se vogliamo sapere a che distanza

disporre le antenne di un sistema DAS MIMO lineare a 4 rami, possiamo osservare il grafico e affermare che la distanza fra le RAU non dovrà essere superiore a 25 metri. Tale ragionamento può essere fatto per ognuno dei sistemi graficati.



**Figura 5.9 : valutazione distanza RAU in funzione del numero medio di rami inutili con potenza delle RAU di 10 dBm**

Possiamo effettuare le stesse valutazioni andando a graficare il numero medio di rami utili in funzione della distanza, sempre considerando una potenza di trasmissione delle RAU di 10 dBm; il grafico appena descritto è mostrato in figura 5.10. Il grafico mostrato è di facile comprensione perchè associa direttamente al numero di rami utili la distanza da utilizzare per la pianificazione, purtroppo la sovrapposizione delle curve dei vari sistemi non lo rendono del tutto comprensibile. Anche in questo grafico sono state analizzate le curve dei sistemi i-DAS MIMO lineare di ordine qualsiasi.



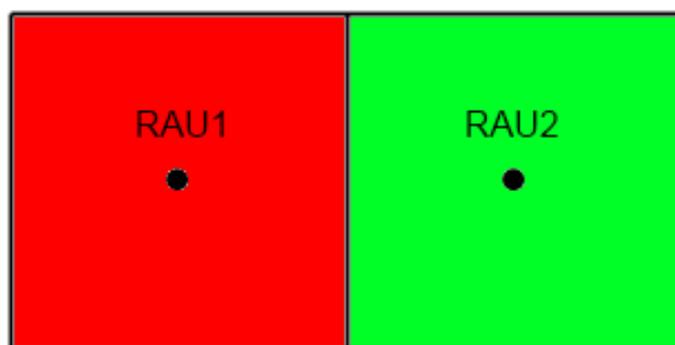
**Figura 5.10: valutazione distanza RAU in funzione del numero medio di rami utili con potenza delle RAU di 10 dBm**

## 5.2 Caso Bidimensionale

### 5.2.1 Interleaved DAS MIMO 2 rami

#### 5.2.1.1 Pianificazione

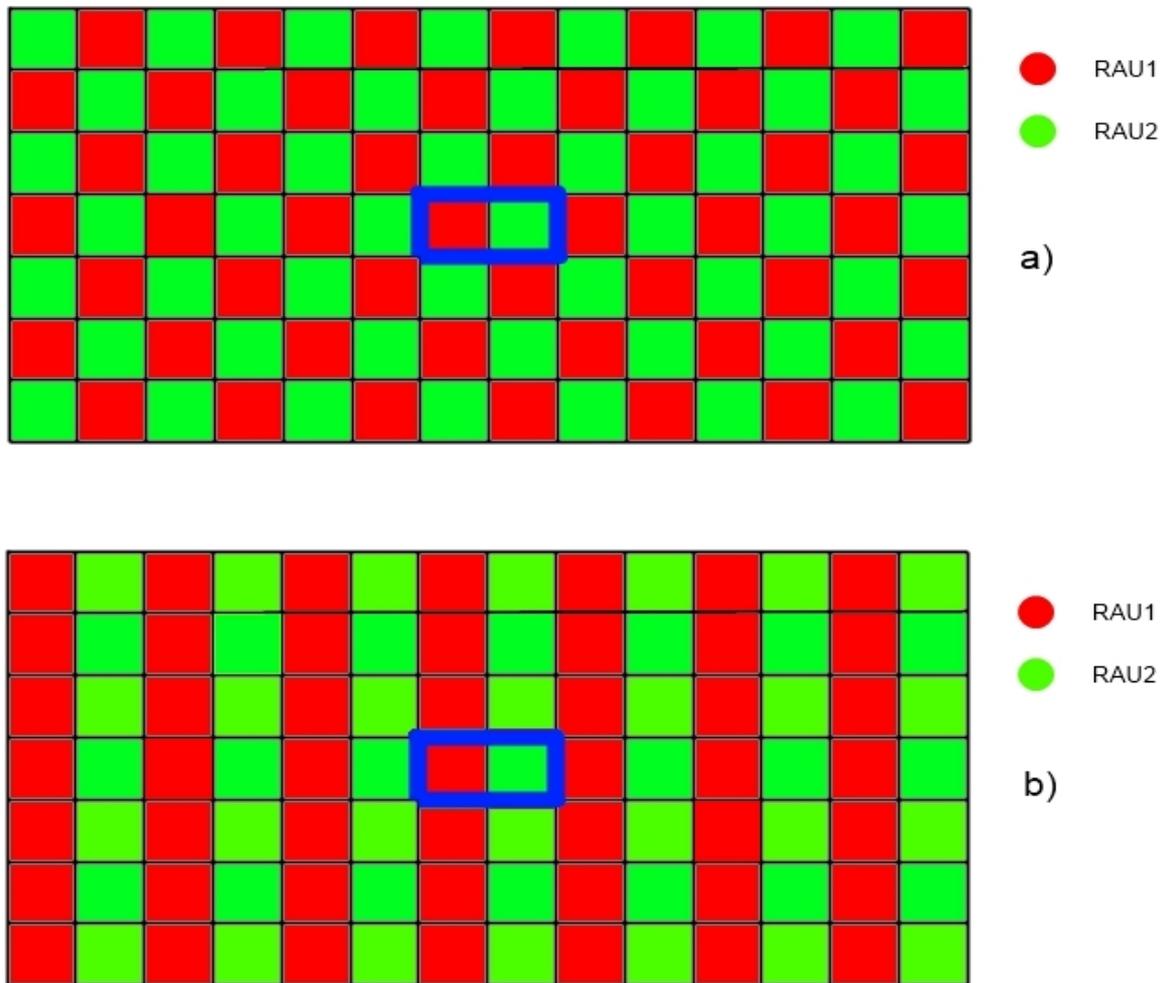
Nel caso bidimensionale prima di tutto si è pensato a come rappresentare la copertura dello spazio, per un fatto di maggior semplicità nell'implementazione della struttura, si è scelto di effettuare una copertura a celle quadrate. Per il sistema preso in considerazione, avente un array di trasmissione composto da due rami, si ha che il cluster è composto come in figura 5.9. La distanza fra le due RAU rispetta i criteri utilizzati per la pianificazione lineare, è quindi stata utilizzata una distanza di 20 m.



**figura 5.9: cluster celle quadrate i-MIMO DAS 2 rami**

La struttura complessiva considerata nel programma è quella composta dalla ripetizione del cluster a due rami. È stata creata una struttura chiusa, formata da una matrice costituita da  $7 \times 7$  ripetizioni del cluster. Data la non simmetria del cluster, si può ottenere un leggero miglioramento nelle prestazioni di copertura, facendo in modo che i cluster siano più intelacciati fra loro. Per fare ciò, si va a scambiare la posizione della RAU1 con quella della RAU2 nelle righe dispari della matrice, in figura 5.10 a) viene mostrata la struttura complessiva che viene implementata nel programma di pianificazione. Il cluster in cui andremo a effettuare le misure è quello posto al centro della matrice, contornato in blu in figura 5.10 a). Il piano di ricezione è posto ad un'altezza di 1,5 metri, mentre le antenne trasmettenti sono poste a 3 metri, livello soffitto. Il ricevitore viene mosso all'interno del cluster centrale, e scandisce tutta la sua superficie raccogliendo i campioni che serviranno ad effettuare le valutazioni. Il ricevitore è limitato ad una sola antenna in ricezione, in quanto come nel caso lineare, i modelli di propagazione utilizzati tengono conto del solo path loss. Le antenne utilizzate in trasmissione sono isotrope e irradiano tutte con la stessa potenza. Il ricevitore tiene in

considerazione tutte le potenze ricevute dalle RAU distribuite nello spazio.



**Figura 5.10: a)matrice traslata dei cluster i-DAS MIMO 2 rami**

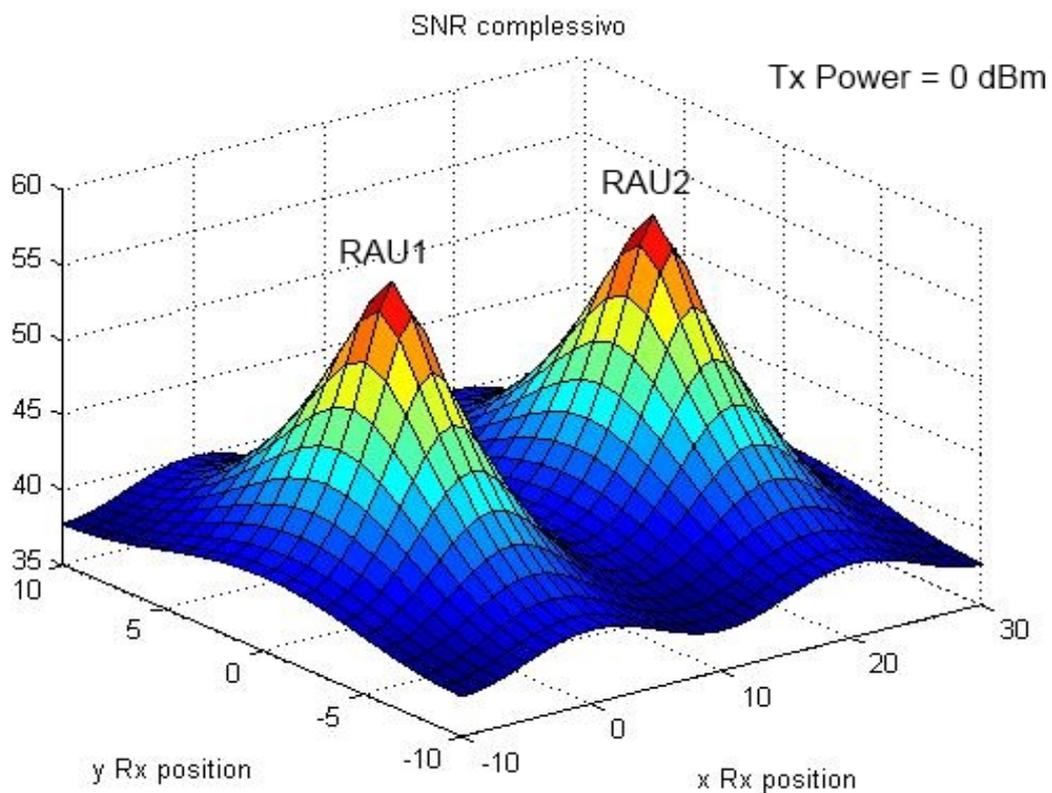
**b)matrice non traslata dei cluster i-DAS MIMO 2 rami**

Il modello di propagazione utilizzato è lo stesso utilizzato per il caso lineare di formula 5.1.0, che si basa sui parametri  $\alpha$  e  $\beta$ .

### **5.2.1.2 Superfici di rapporto segnale rumore**

Passando al caso bidimensionale, non avremo più un profilo di SNR, ma una superficie ottenuta grazie al campionamento fatto su tutta l'area del cluster centrale. Il SNR complessivo è calcolato tenendo in

considerazione tutti i contributi in potenza ricevuti da tutte le antenne trasmettenti distribuire nello spazio. Impostando una potenza di trasmissione delle RAU di 0 dBm si ottiene una superficie di SNR complessivo come quella in figura 5.11. Le RAU più vicine sono quelle che danno il contributo maggiore, e sono posizionate esattamente dove sono presenti i due massimi della superficie del SNR complessivo.

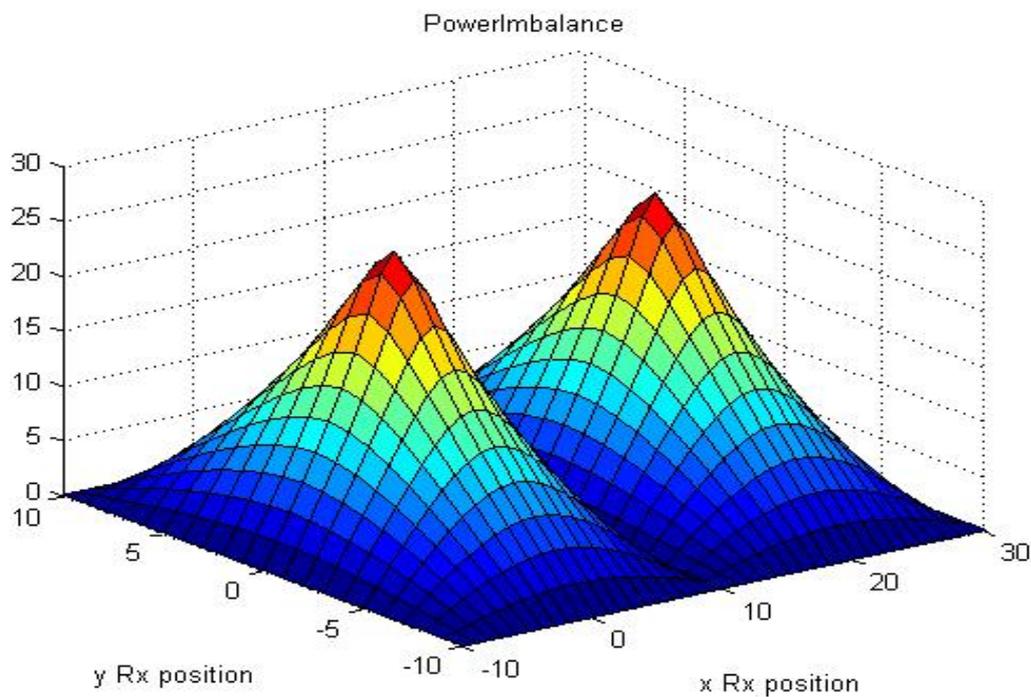


**Figura 5.11: SNR complessivo i-DAS MIMO 2 rami con potenza RAU 0 dBm**

### 5.2.1.3 Power Imbalance

Il power imbalance nel caso bidimensionale, come per il caso lineare, è la differenza fra le potenze ricevute dai due rami MIMO, dove la

potenza di un ramo 1 è costituita dal contributo in potenza di tutte le RAU1, e la potenza del ramo 2 è data dal contributo di tutte le RAU2. L'imbalance non dipende dalla potenza in trasmissione ma varia, come nel caso lineare, se si vanno a modificare i valori di  $\alpha$  e  $\beta$  presenti nel modello di propagazione. Nel caso bidimensionale è rappresentato da una superficie come per il SNR. In figura 5.12 è mostrato il grafico del power imbalance per valori di  $\alpha = 2$  e  $\beta = 0.5$ .



**Figura 5.12: power imbalance i-DAS MIMO 2 rami**

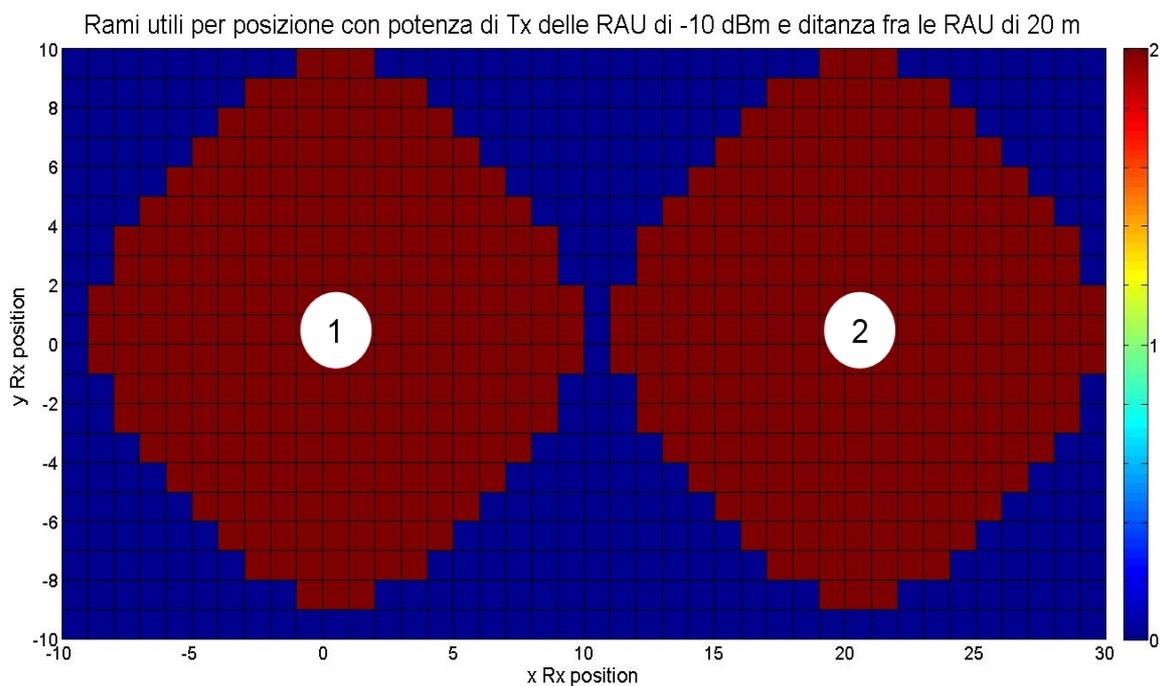
I valori massimi di imbalance sono collocati dove si ha la maggior differenza fra le potenze ricevute dai due rami MIMO, i punti sono due e coincidenti con la posizione delle RAU, perché in essi arriva il contributo maggiore in potenza da parte di una delle due antenne trasmittenti. I valori di imbalance nullo sono molteplici e sono localizzati nelle posizioni in cui ho uno sbilanciamento di potenza

nullo fra i due rami MIMO. Per i sistemi di ordine superiore a quello studiato in questo paragrafo, non andremo più a visualizzare il power imbalance ma ci baseremo sulle condizione estrapolata nel paragrafo 5.1.4 che considera un ramo inutile se ha un SNR inferiore a 15 dB, il ramo analizzato sarà troppo sbilanciato per dare un contributo significativo al throughput.

#### **5.2.1.4 Grafici di copertura**

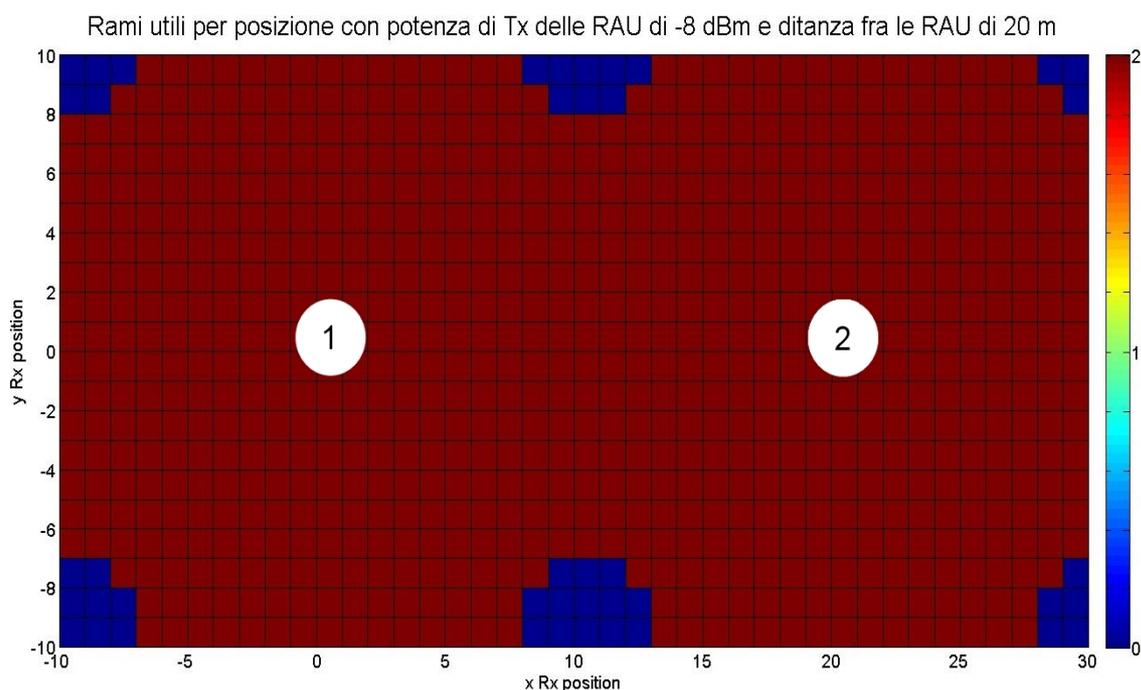
Possiamo fare una valutazione sulla copertura in funzione del numero di rami utili. Tale numero è calcolato per tutte le posizioni campionate dal ricevitore, sottraendo al numero di rami del sistema, che in questo caso sono 2, il numero di rami inutili. Il numero di rami inutili su una posizione campionata, è ottenuto facendo il controllo sulla potenza ricevuta dal singolo ramo, se risulta inferiore a 15 dB il ramo è da scartare perché troppo debole e sbilanciato rispetto all'altro. Se entrambi i rami MIMO risultano sotto la soglia dei 15 dB, non possiamo avere un SNR complessivo superiore alla soglia dei 30 dB, che è indispensabile per il funzionamento dell'intero sistema; infatti quando il SNR complessivo è inferiore a tale soglia l'i-MIMO DAS diventa inefficiente, e il numero di rami utili è nullo. I grafici di copertura che possono essere mostrati sono molteplici, perché si possono graficare a varie potenze di trasmissione delle RAU. I grafici sono calcolati considerando nel modello di propagazione per il calcolo delle potenze valori di  $\alpha = 2$  e  $\beta = 0.5$ . In figura 5.13 è mostrata l'immagine riguardante il numero di rami utili per la superficie del cluster campionato, con una distanza fra le RAU di 20 metri e una

potenza in trasmissione di -10 dBm. La posizione delle RAU è contrassegnata dal numero all'interno del cerchio bianco. Si può notare che nonostante si trasmetta con una potenza così bassa, abbiamo che vicino alle RAU, il numero di rami utilizzabili è massimo. Allontanandosi dalle antenne trasmittenti non si hanno più rami utili a causa della SNR insufficiente. Se si fa aumentare la potenza in trasmissione delle RAU senza modificarne la distanza, avremo che la zona in blu dove non ci sono rami utili tenderà a restringersi.



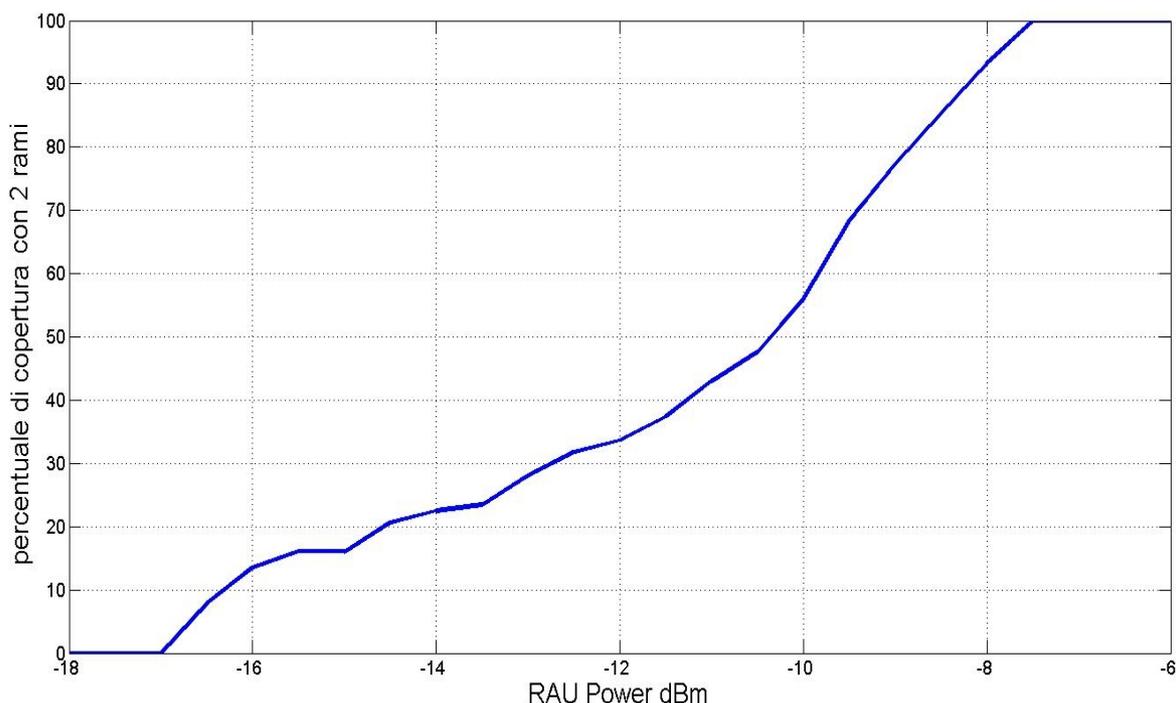
**Figura 5.13:grafico copertura rami utili i-MIMO DAS 2 rami con potenza delle RAU di -10 dBm**

In figura 5.14 sono graficati il numero di rami utili con una potenza di trasmissione di -8 dBm. A tale potenza si ha che la copertura dell'area di sondaggio, a massimo numero di rami utili, per la pianificazione i-MIMO DAS 2 rami, è quasi completa.



**Figura 5.14: grafico copertura rami utili i-MIMO DAS 2 con potenza delle RAU di -8 dBm**

Per avere un'idea complessiva dell'andamento della copertura, fatta col massimo numero di rami utili, è stato implementato un programma che prende un vettore ordinato di potenze in ingresso; tali potenze vengono utilizzate per generare più realizzazioni di copertura come quelle viste nelle figure 5.13 e 5.14. Da ognuna di esse viene ricavata la percentuale a massimo numero di rami utili, fatta sul numero di campioni presi nell'area di sondaggio; i valori di copertura ottenuti vengono riportati in un grafico in funzione della potenza di trasmissione utilizzata dalle RAU. In figura 5.15 è analizzato il grafico relativo alla copertura percentuale per  $\alpha = 2$  e  $\beta = 0.5$ .



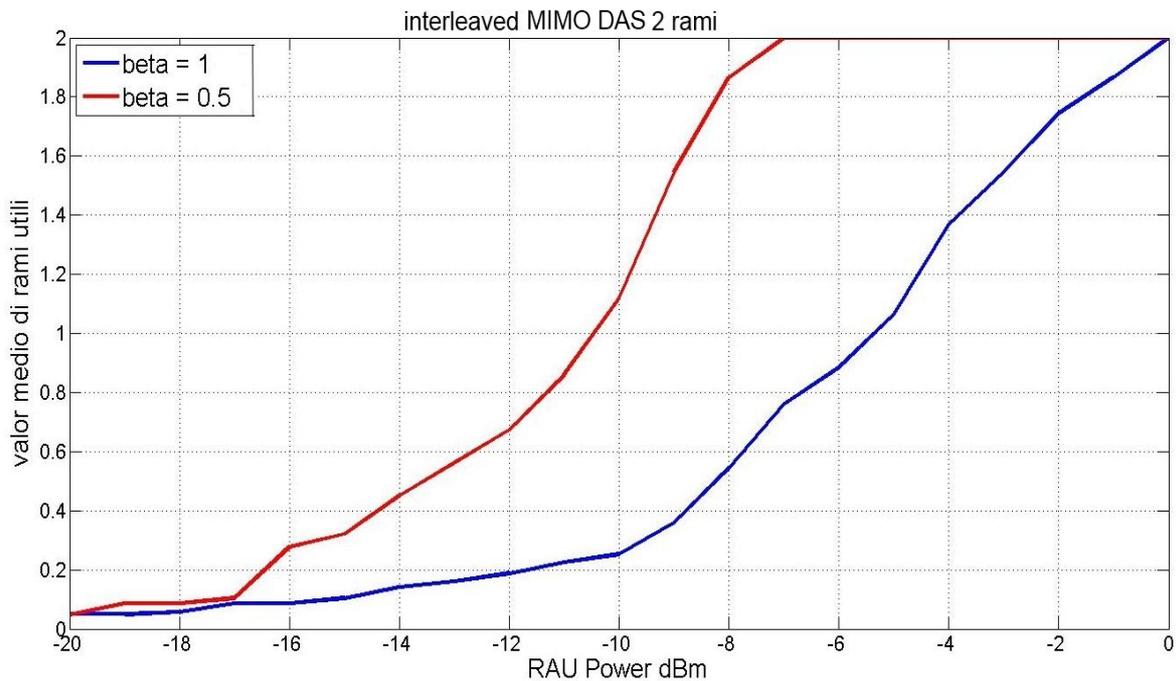
**Figura 5.15: copertura percentuale a massimo numero di rami utili i-MIMO DAS 2 rami**

Nel grafico sopra riportato si può confermare quello che già abbiamo visto nelle figura 5.14, a -8 dBm di potenza trasmessa dalle RAU, si ha una copertura con due rami dell'area sondata del 95% circa; è sufficiente raggiungere circa - 7 dBm di potenza trasmessa per ottenere il 100% della copertura.

#### **5.2.1.5 Valutazione sul numero medio di rami utili e inutili**

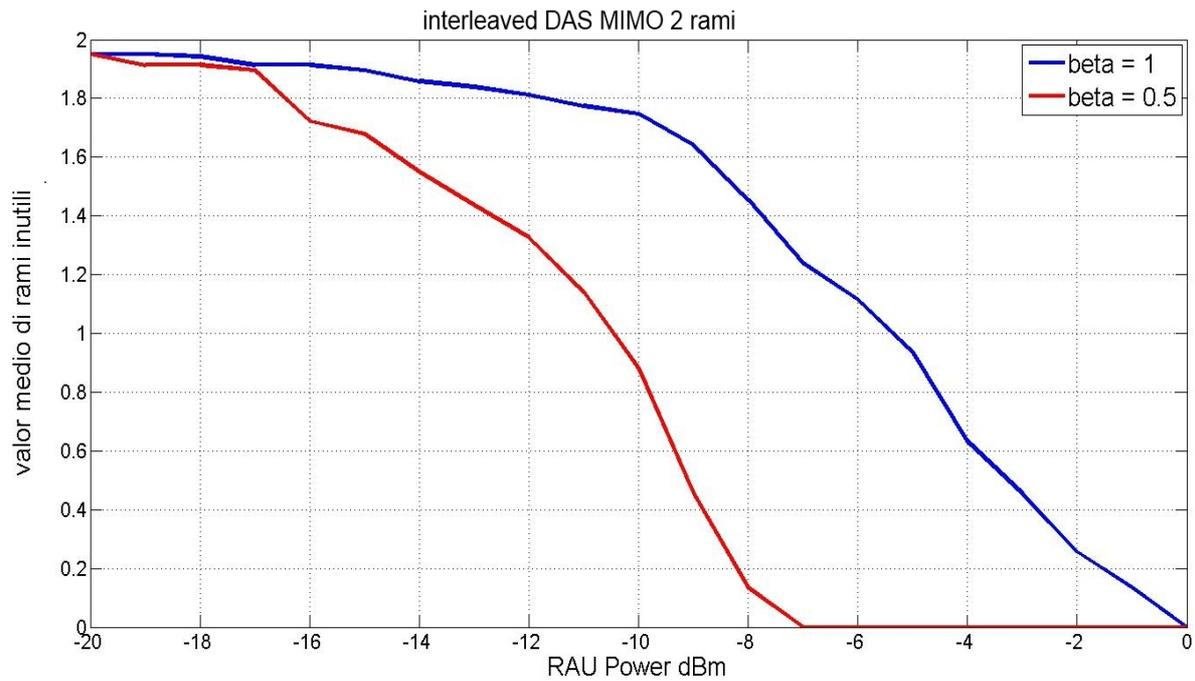
Con un procedimento simile a quello con cui si calcola la percentuale di copertura a massimo numero di rami utili, possiamo determinare il numero medio di rami utili/inutili in funzione della potenza trasmessa dalle antenne remote. Da ogni realizzazione di copertura bidimensionale, si può calcolare il valore medio di rami utili/inutili pertinenti al cluster di misura, e quindi è possibile estrapolare le

specifiche di progetto per la pianificazione di un sistema i-MIMO DAS 2 rami bidimensionale. Inoltre, il valor medio di rami utili/inutili è stato calcolato per due valori di attenuazione  $\beta$ . Sono stati scelti come valori 0,5 dB/m e 1 dB/m, il primo valore sarà caratteristico di un ambiente indoor che presenta una minor attenuazione, mentre il secondo di un ambiente che presenta attenuazioni maggiori alla propagazione. In figura 5.16 è mostrato il valor medio di rami utili per il caso di pianificazione traslata del sistema i-MIMO DAS 2 rami. Il passo di campionamento delle potenze è di 1 dB. Nel grafico si evidenzia il comportamento del valor medio dei rami utili nelle due diverse condizioni di propagazione introdotte con il parametro  $\beta$ . Nel caso con attenuazione maggiore  $\beta = 1$  dB/m serve una potenza più alta per raggiungere in media due rami utili, rispetto al caso con minore attenuazione.



**Figura 5.16: valor medio rami utili i-MIMO DAS 2 rami**

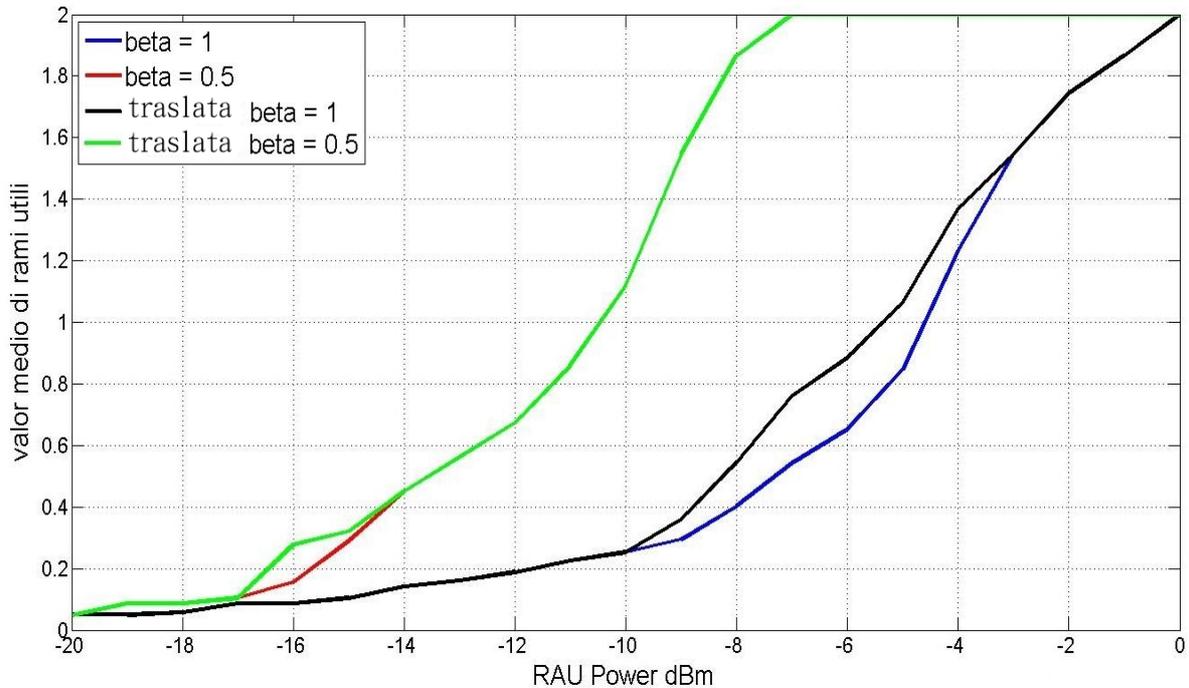
In maniera duale possiamo anche graficare il valor medio di rami inutili per i due valori di  $\beta$ , figura 5.17, si può notare che le curve sono le stesse del grafico relativo ai rami utili ma ribaltate rispetto a un ipotetico asse orizzontale.



**Figura 5.17: valor medio rami inutili i-MIMO DAS 2 rami**

Avevamo già anticipato che la struttura tralata è quella che fornisce una miglior copertura in termini di area servita e di numero medio di rami utili, come verifica si è messo a confronto il valor medio di rami utili per la pianificazione di figura 5.10 a) con la pianificazione in cui non sono applicate traslazioni dei cluster, figura 5.10 b). Il confronto appena descritto è mostrato in figura 5.18. Anche in questo caso si sono graficate le curve per due valori di  $\beta$ . Nel caso con  $\beta = 0.5$  si ha un piccolo miglioramento del caso traslato, ma le curve sono sovrapposte nella maggior parte dei casi. Per le curve calcolate con  $\beta = 1$  si può notare che la linea della pianificazione traslata è

leggermente migliore. Dai risultati ottenuti possiamo sbilanciarci e dire che è preferibile attuare una pianificazione traslata, essendo anche più sensata. Il confronto fra i due modi di pianificare non ha evidenziato grandi differenze.

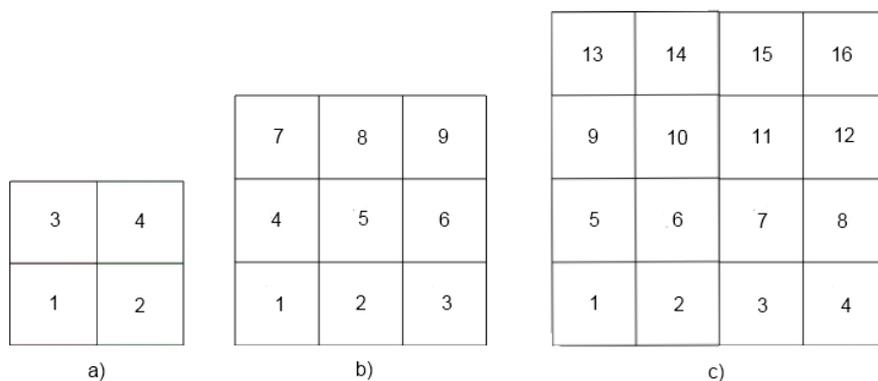


**Figura 5.18: confronto valor medio rami utili pianificazione i-DAS MIMO 2 rami traslata e non al variare di  $\beta$**

## 5.2.2 i-MIMO DAS 4-9-16 rami

### 5.2.2.1 Pianificazione

Ci si avvale della copertura a celle quadrate utilizzata già per il caso bidimensionale a due rami. I sistemi i-MIMO DAS a 4, 9 e 16 rami che andremo ad analizzare, sono stati raggruppati assieme perché hanno la caratteristica di avere un cluster quadrato; le strutture sono riprodotte in figura 5.19 a), b) e c).



**figura 5.19: a)cluster size i-MIMO DAS 4 rami b)cluster size i-MIMO DAS 9 rami c)cluster size i-MIMO DAS 16 rami**

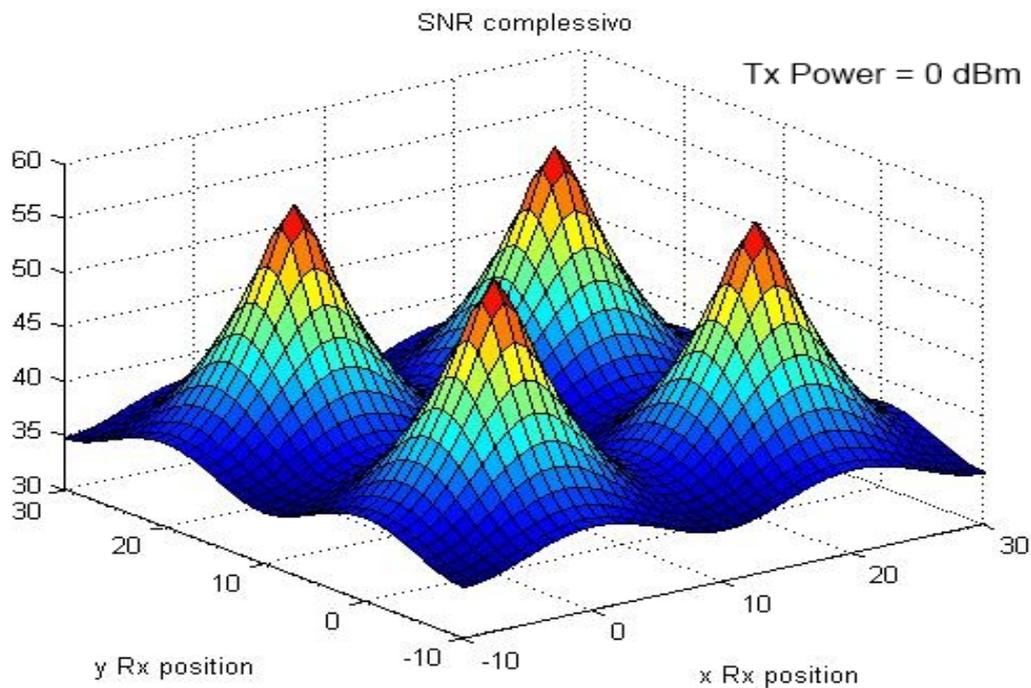
Le RAU sono posizionate al centro della cella, distano 20 metri l'una dall'altra e sono poste ad un'altezza di 3 metri, mentre il piano di ricezione è situato ad 1,5 metri. Nel programma di pianificazione implementato, impostando il parametro che rappresenta il numero dei rami, si può scegliere quale tipo di sistema utilizzare. Se si imposta un numero di rami pari a 4 si utilizzerà il cluster in figura 5.19 a), con 9 rami quello in figura 5.19 b) e per 16 rami quello in figura 5.19 c).

Per tutti i tre tipi di sistemi la copertura dell'ambiente viene eseguita ripetendo il cluster in modo da formare una struttura chiusa a matrice di cluster di dimensioni 7x7. La superficie su cui andremo a effettuare le misure è il cluster che è posto al centro di tale matrice. Per quanto riguarda i modelli di propagazione sono gli stessi visti nel caso lineare nel paragrafo 5.1.1.

#### **4.1.2 5.2.2.2 DAS MIMO 4 rami**

##### **5.2.2.2.1 Superficie di rapporto segnale rumore**

In figura 5.20 è mostrato il SNR complessivo per una pianificazione DAS MIMO a 4 rami per valori di  $\alpha = 2$  e  $\beta = 0.5$ .



**Figura 5.20: SNR complessivo i-DAS MIMO 4 rami con potenza delle RAU di 0 dBm**

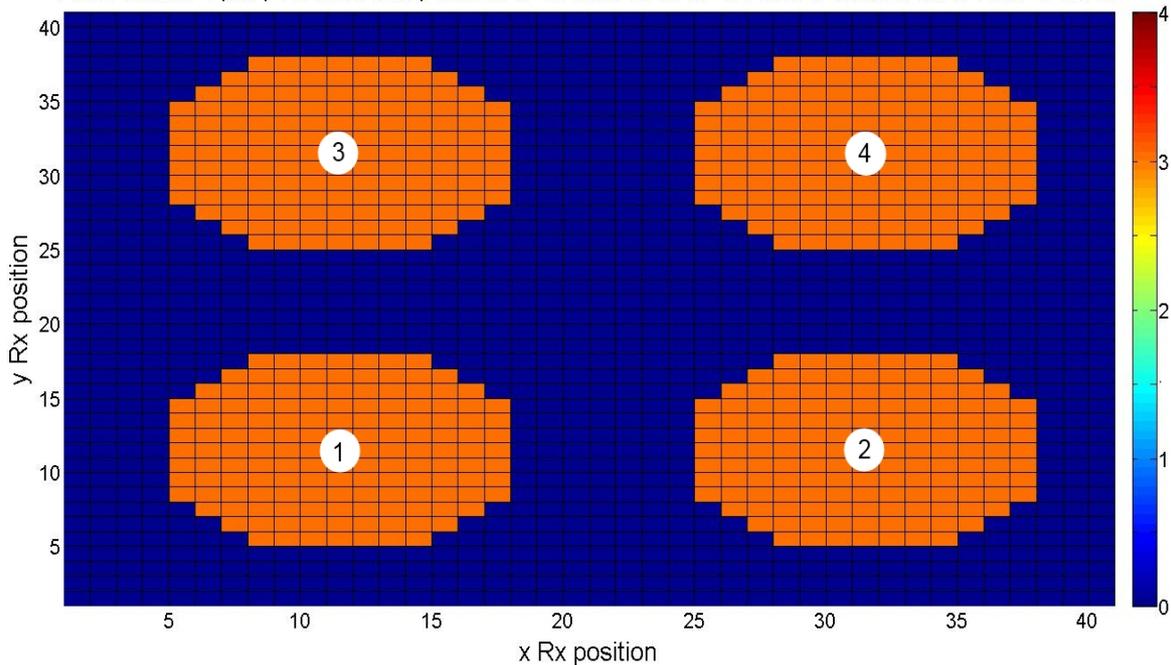
Notiamo che il SNR complessivo non scende mai sotto la soglia di funzionamento del sistema, i famosi 30 dB, anche se le RAU trasmettono con una potenza relativamente bassa. In realtà con potenze di trasmissione basse, andando ad osservare i contributi in potenza dei singoli rami MIMO, vedremo che alcuni di questi non saranno adeguati al funzionamento ottimale del collegamento. Andiamo ora a valutare tali aspetti attraverso i grafici di copertura che fanno riferimento al numero di rami utili.

#### **5.2.2.2.2 Grafici di copertura rami utili**

Come per il caso della pianificazione a due rami andremo a valutare i grafici che mostrano il numero di rami utili in base alla potenza di trasmissione scelta per le RAU. I valori di potenza utilizzati, sono presi in modo da far risaltare il comportamento del sistema che

andremo a valutare. Grafichiamo ora le coperture con potenze delle antenne remote crescenti per valori di  $\alpha = 2$  e  $\beta = 0.5$ , in figura 5.21 è mostrato il numero di rami utili per una potenza di trasmissione di -12dBm. Si può notare che si raggiunge un numero massimo di rami utili pari a 3, l'area blu è quella in cui il SNR complessivo è inferiore a 30 dB e quindi non ci sono rami utili.

Rami utili su 4 per posizione con potenza di Tx delle RAU di -12 dBm e distanza fra le RAU di 20 m

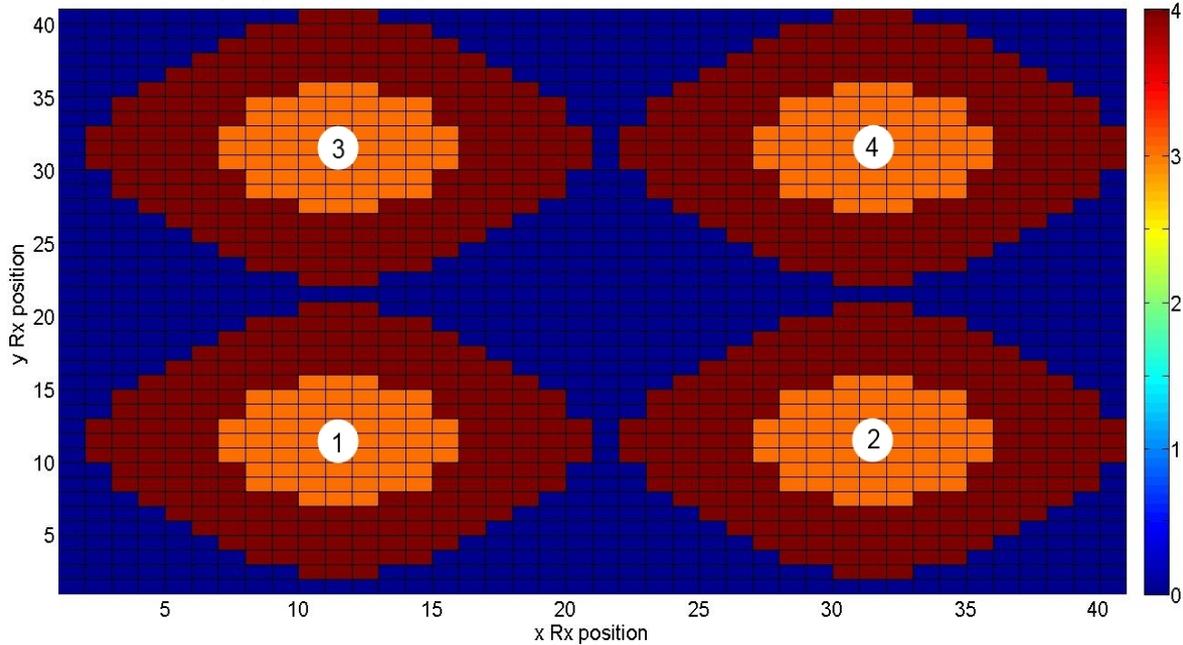


**Figura 5.21: grafico copertura rami utili i-MIMO DAS 4 rami con potenza delle RAU di -12 dBm**

Per migliorare la copertura facciamo crescere la potenza di trasmissione delle antenne remote, in figura 5.22 la potenza utilizzata è di -10 dBm. Le zone in rosso sono quelle in cui il sistema ha raggiunto il numero massimo di rami utili, in quei punti tutte le antenne di trasmissione appartenenti all'array del MIMO sono ricevute dal mobile con una potenza superiore a 15 dB; la zona arancio ha solo 3 rami utili, cio significa che in qmamo inutile il cui contributo è sotto

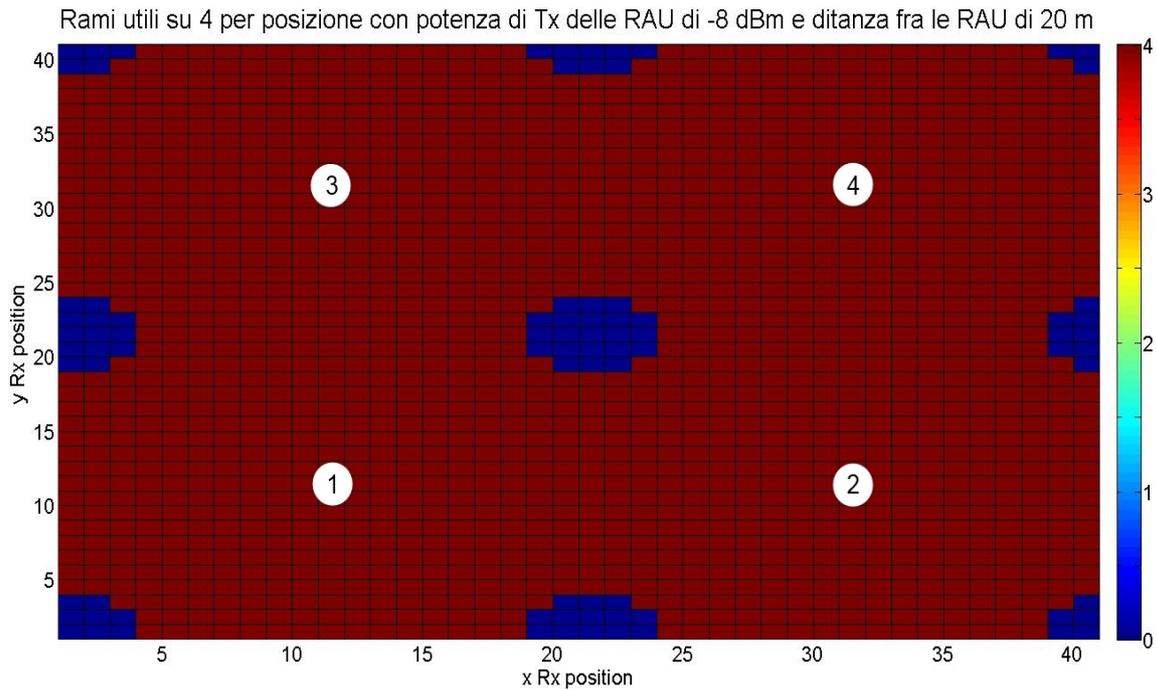
i 15 dB, questo è dovuto al fatto che la potenza trasmessa non è sufficiente a colmare lo sbilanciamento di un ramo. Il ramo inutile sarà quello più lontano rispetto alla posizione scansionata del ricevitore.

Rami utili su 4 per posizione con potenza di Tx delle RAU di -10 dBm e distanza fra le RAU di 20 m



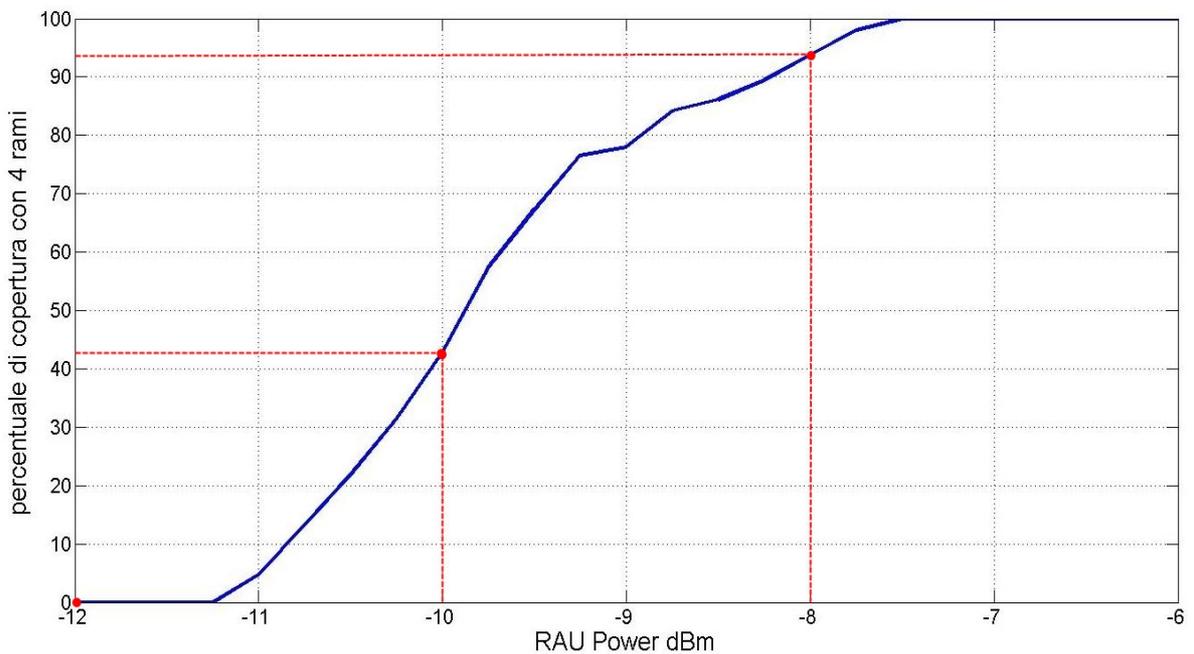
**Figura 5.22: grafico copertura rami utili i-MIMO DAS 4 rami con potenza delle RAU di -12 dBm**

In figura 5.23 si è passati a -8 dBm di potenza trasmessa, si può vedere un notevole miglioramento della copertura, infatti il sistema funziona a regime su quasi tutta la superficie scansionata dal ricevitore. La superficie ricoperta di blu ha ancora un valore nullo di rami utili, questo perché si trasmette con potenze molto basse.



**Figura 5.23:i-MIMO DAS 4 rami con potenza delle RAU di -12 dBm**

Come per il i-MIMO DAS 2 rami andiamo a graficare in figura 5.24 la curva di copertura percentuale a massimo numero di rami utili.

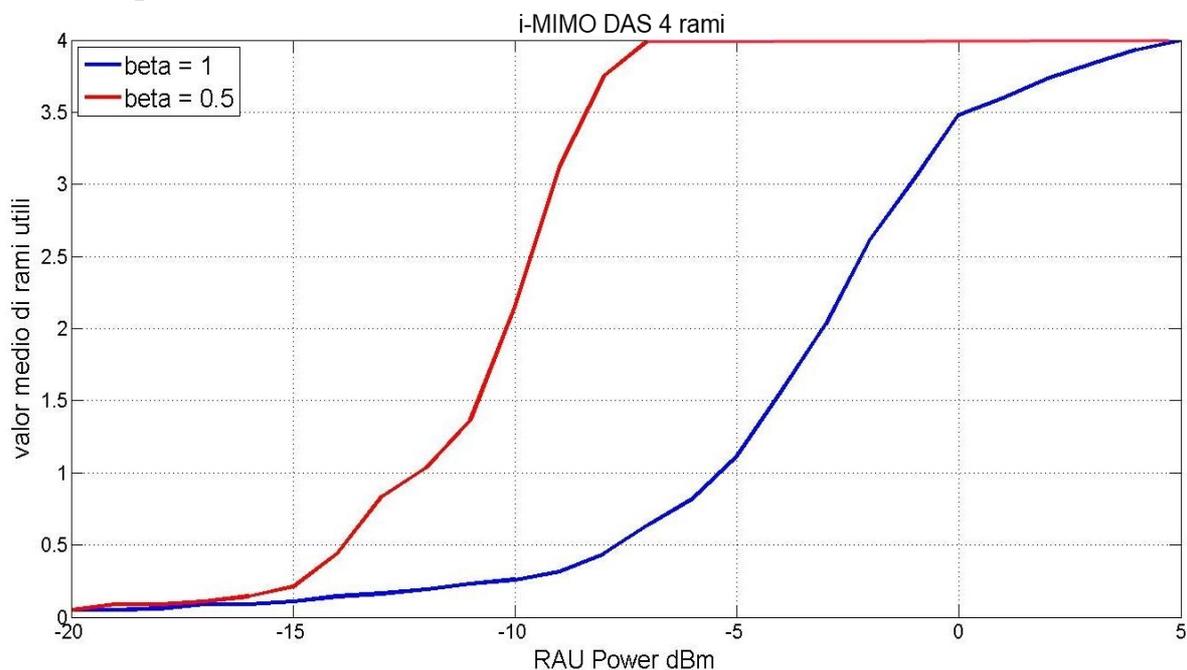


**Figura 5.24:copertura percentuale a massimo numero di rami utili  
i-MIMO DAS 2 rami**

I valori di percentuale ricavati sono riferiti al funzionamento che sfrutta tutti i rami disponibili, nel caso preso in esame saranno 4. In figura 5.24 è graficata la curva appena descritta con  $\alpha = 2$  e  $\beta = 0.5$ , i valori percentuali in ordinata sono stati calcolati per un passo di 0,25 dBm del vettore delle potenze. Si può notare che il 100 % di copertura è ottenuto per una potenza di trasmissione delle RAU di circa -7.5 dBm. I punti rossi nel grafico rappresentano le percentuali di copertura a 4 rami utili delle figure 5.21, 5.22, 5.23.

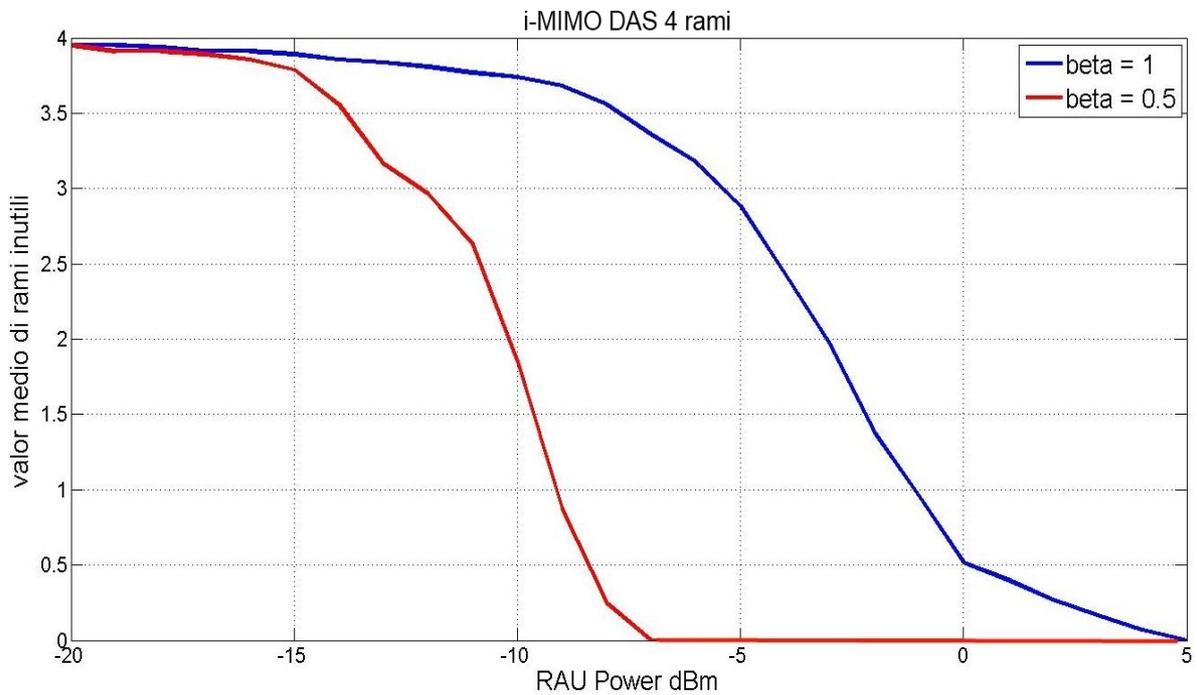
### 5.2.2.2.3 Valutazione sul numero medio di rami utili e inutili

In questo paragrafo andiamo a valutare il valore medio di rami utili/inutili in funzione della potenza trasmessa dalle RAU, nel caso di pianificazione DAS MIMO 4 rami. Come per il caso a due rami utilizzeremo due valori di  $\beta$  e  $\alpha = 2$  fisso. In figura 5.25 viene mostrato il grafico appena descritto riguardante il valore medio di rami utili per il sistema DAS MIMO 4 rami.



**Figura 5.25: valor medio rami utili i-MIMO DAS 4 rami**

In figura sopra se si va a considerare la curva con  $\beta = 0.5$ , abbiamo che il valore medio raggiunge i 4 rami utili a una potenza emessa dalle RAU che è la stessa che si ha nel grafico di copertura percentuale in figura 5.24, che vale  $-7.5$  dBm. A parità di valor medio di rami utili la curva calcolata per  $\beta = 1$  richiede un dispendio molto maggiore di potenza trasmessa, questo fa capire quanto l'ambiente possa incidere negativamente sulla propagazione. In figura 5.26 mostriamo il caso duale del grafico precedente cioè quello che mostra il valor medio di rami inutili.

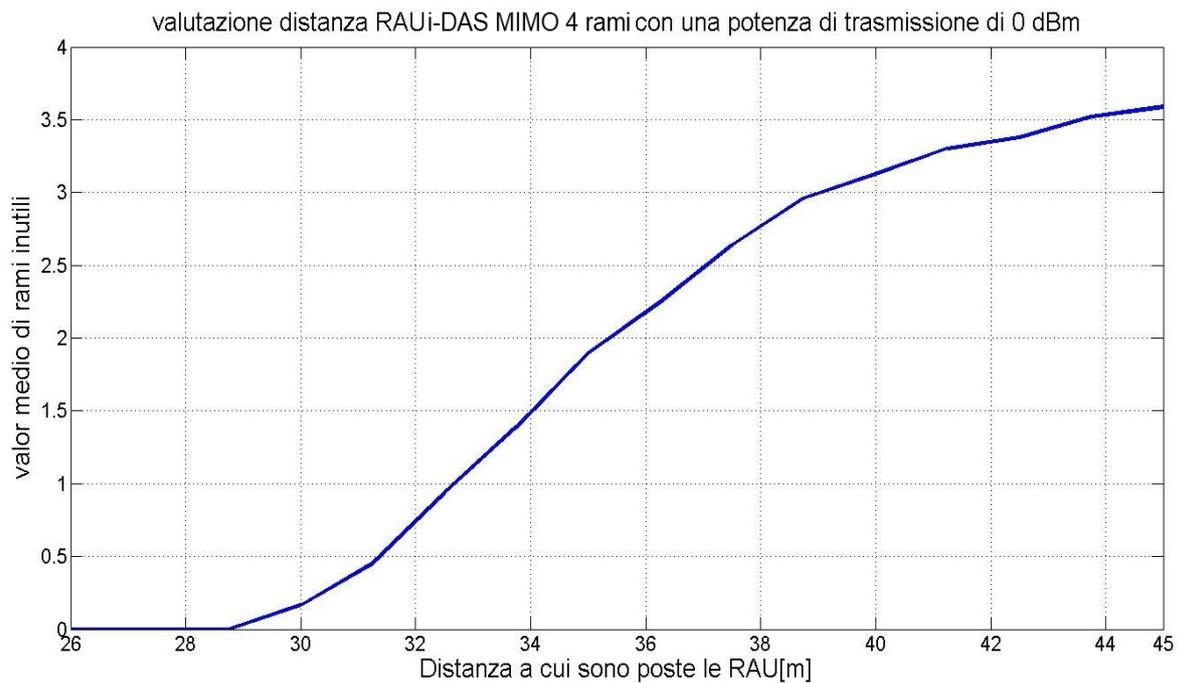


**Figura 5.26: valor medio rami utili i-MIMO DAS 4 rami**

### 5.2.2.2.3 Valutazione sulla distanza

Nel caso lineare abbiamo considerato la distanza a cui porre le antenne distribuite come parametro di progetto, fissata una potenza di trasmissione per le RAU. Nel caso bidimensionale abbiamo scelto come esempio il sistema DAS MIMO 4x4. Ci siamo posti di

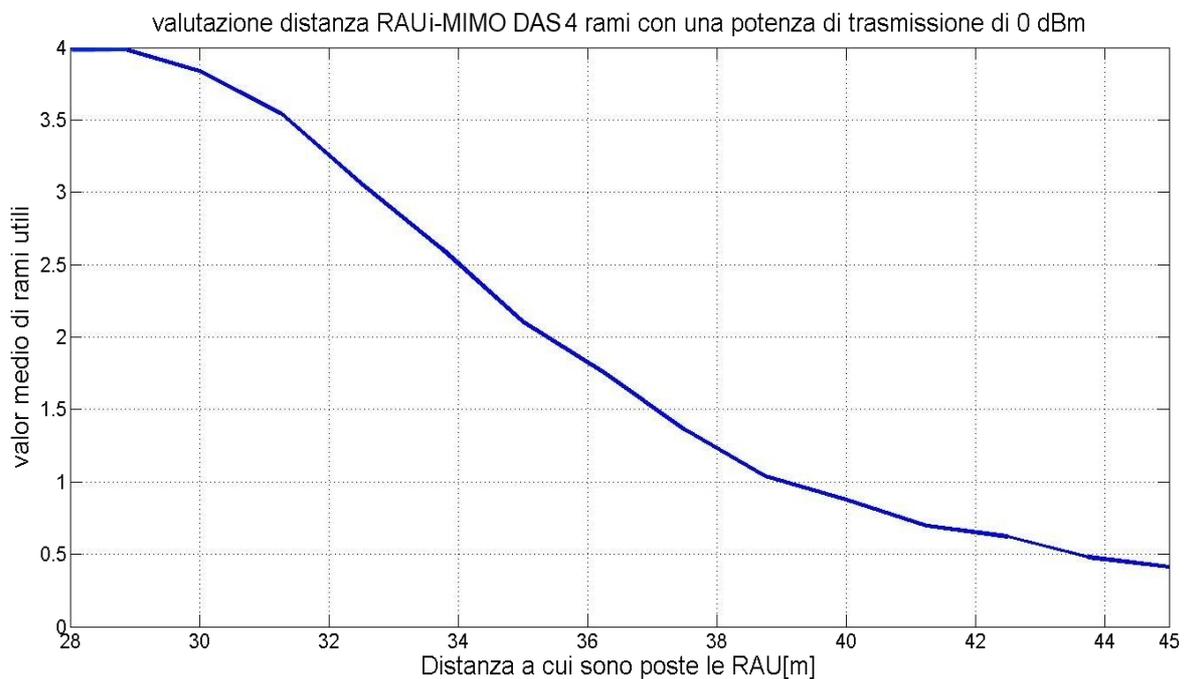
determinare la distanza a cui porre le RAU, fissata la potenza di trasmissione di ogni antenna. I grafici che andremo a esporre mostrano il valor medio di rami utili/inutili in funzione della distanza a cui sono poste le antenne remote. Le curve sono state ottenute considerando come parametri del modello di propagazione  $\alpha = 2$  e  $\beta = 0.5$ . Si è scelto di utilizzare una potenza in trasmissione di 0 dBm per ottenere i grafici seguenti, ma il programma di calcolo può essere utilizzato per valutare le distanze con il valore di potenza emessa dalle RAU che si vuole simulare. In figura 5.27 viene mostrato il numero medio di rami inutili in funzione della distanza, per il sistema DAS MIMO 4x4 con una potenza emessa dalle RAU di 0 dBm.



**Figura 5.27: valutazione distanza RAU in funzione del numero medio di rami inutili con potenza delle RAU di 10 dBm del sistema i-DAS MIMO 4 rami**

Nella figura sopra si può notare che a se pianifichiamo le antenne ad

una distanza massima di 29 metri avremo che il valor medio di rami inutili sarà nullo. Aumentando la distanza oltre i 29 metri il sistema non sfrutterà più le proprie capacità e avremo un calo del throughput. Possiamo effettuare le stesse valutazioni andando a graficare il numero medio di rami utili in funzione della distanza, sempre considerando una potenza di trasmissione delle RAU di 0 dBm; il grafico appena descritto è mostrato in figura 5.28.



**Figura 5.28: valutazione distanza RAU in funzione del numero medio di rami utili con potenza delle RAU di 10 dBm del sistema i-DAS MIMO 4 rami**

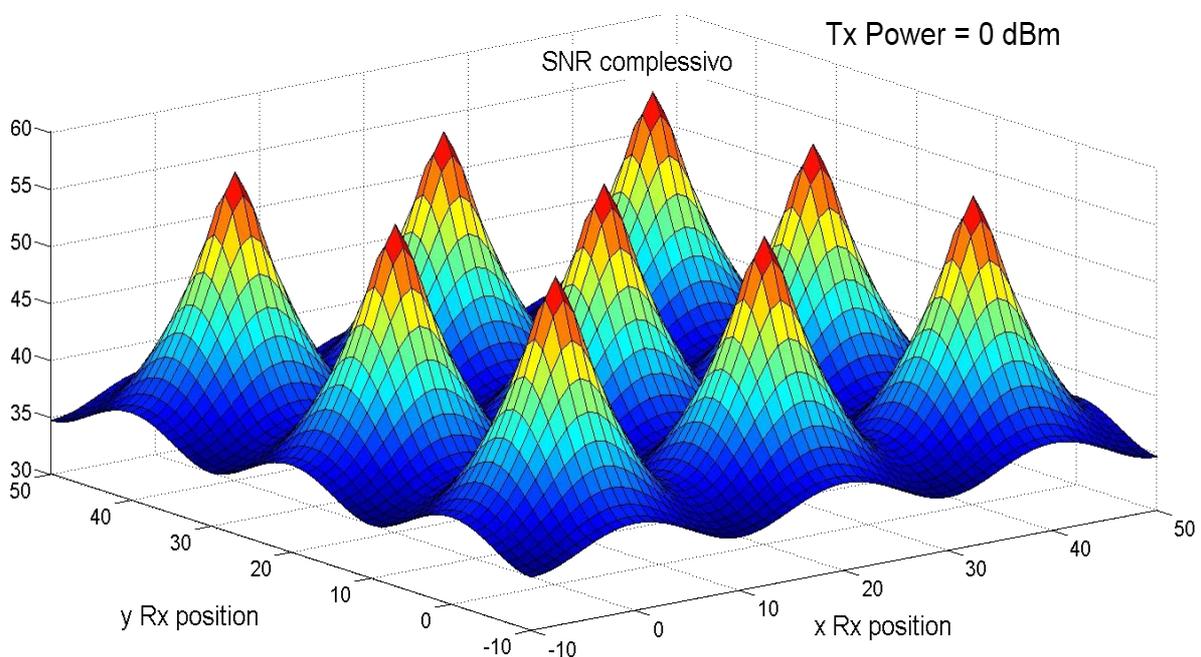
Il grafico sopra mostrato è di facile comprensione perché associa direttamente il numero di rami utili con la distanza da utilizzare per la pianificazione. Ponendo le RAU ad una distanza di 29 metri il sistema funziona con un valor medio di rami utili che è pari all'ordine del sistema. Con l'aumento della distanza il numero di rami utilizzabili

cala abbastanza rapidamente e si avrà una conseguente diminuzione delle prestazioni introdotte dal sistema MIMO. Entrambi i grafici appena mostrati danno indicazioni sulla distanza di posizionamento delle RAU.

### 5.2.2.3 DAS MIMO 9 rami

#### 5.2.2.3.1 Superficie di rapporto segnale rumore

In figura 5.27 è mostrato il SNR complessivo per una pianificazione i-MIMO DAS a 9 rami per valori di  $\alpha = 2$  e  $\beta = 0.5$ .



**Figura 5.27:SNR complessivo i-DAS MIMO 9 rami con potenza delle RAU di 0 dBm**

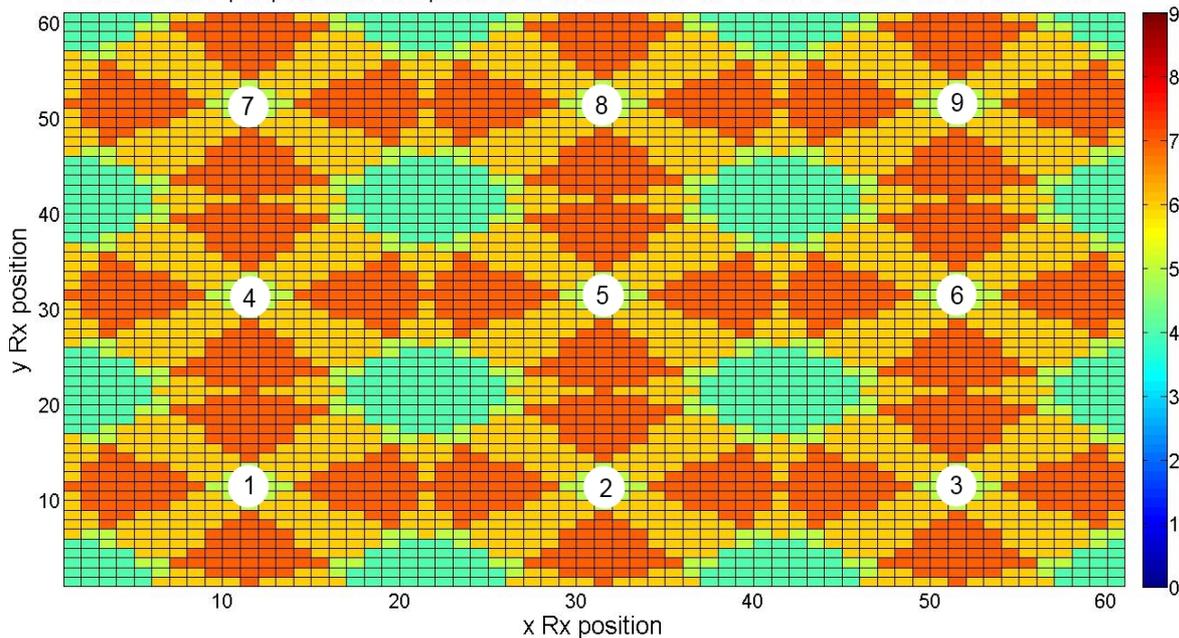
Anche per il caso a 9 rami con una potenza di trasmissione delle RAU di 0 dBm il valore di SNR non scende sotto la soglia dei 30 dB.

#### 5.2.2.3.2 Grafici di copertura rami utili

Andiamo ora a valutare le superfici di copertura dei rami utili in base alla potenza trasmessa dalle RAU per la pianificazione a 9 rami per valori di  $\alpha = 2$  e  $\beta = 0.5$ . In figura 5.28 la potenza trasmessa dalle

antenne remote è di -5 dBm, a tale potenza i rami utilizzabili sono almeno 4, in alcune posizioni si arriva fino a 7 ma con percentuali di copertura basse. Si può osservare che in nessun campione dell'area di scansione si raggiungono i 9 rami utili, ciò è dovuto dall'aumento delle distanze fra il mobile e le antenne distribuite e dalla non sufficiente potenza trasmessa.

Rami utili su 9 per posizione con potenza di Tx delle RAU di -5 dBm e distanza fra le RAU di 20 m

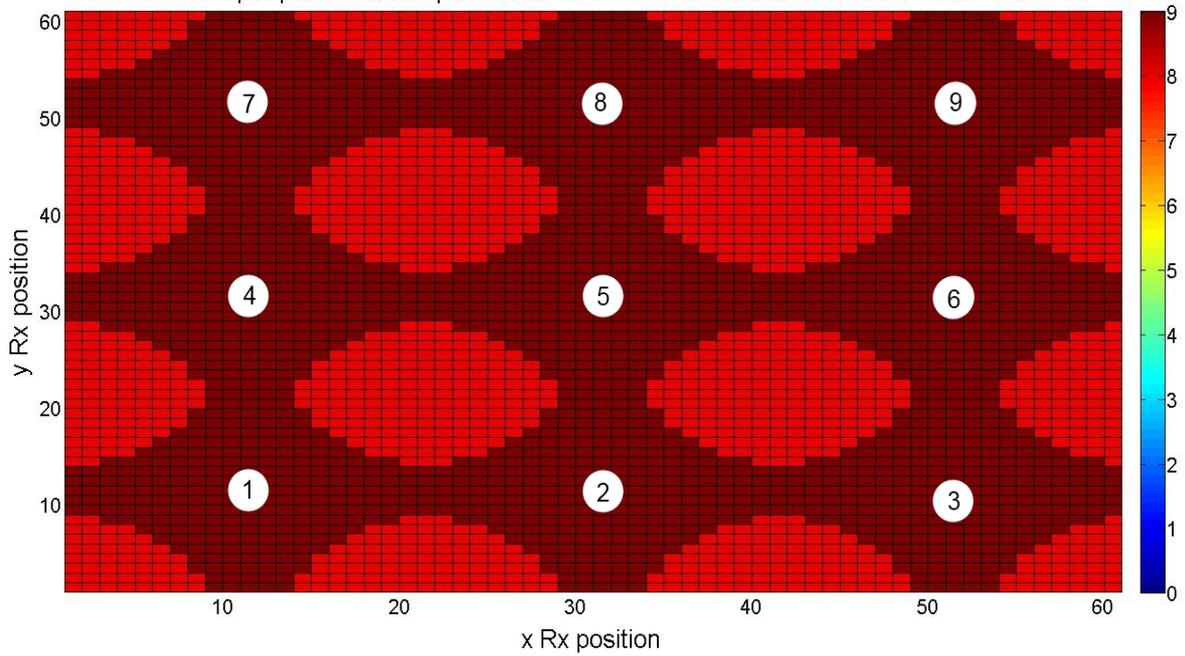


**Figura 5.28:i-MIMO DAS 4 rami con potenza delle RAU di -5 dBm**

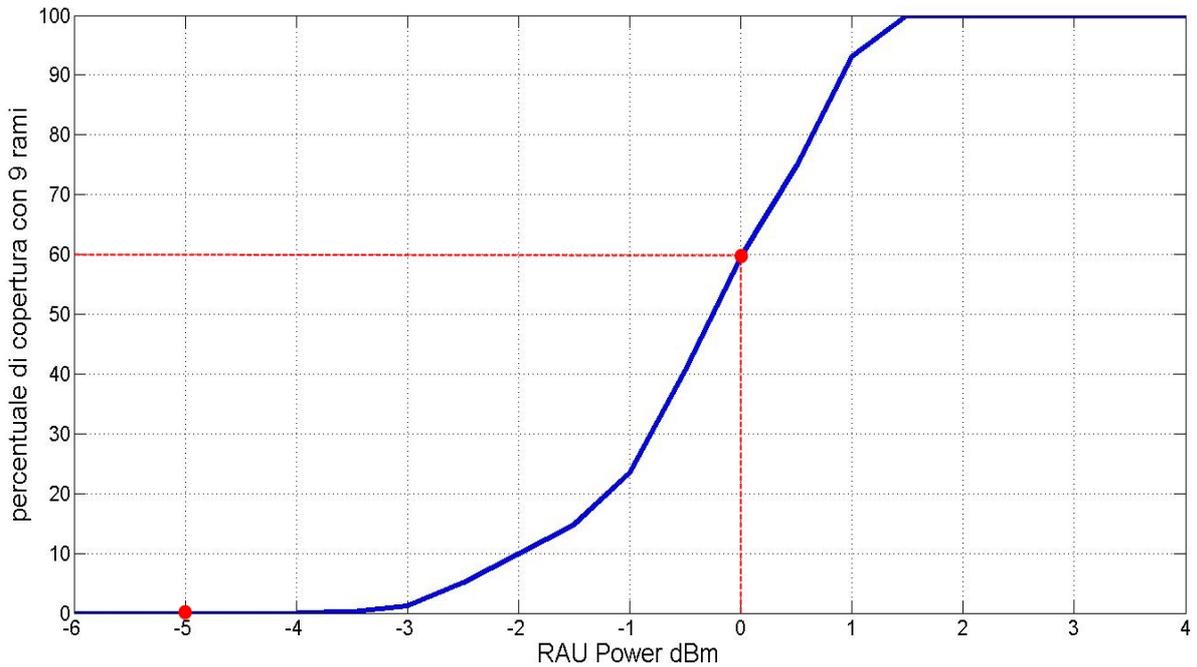
Utilizziamo una potenza maggiore la situazione migliora, in figura 5.29 la potenza emessa è di 0 dBm, per tale valore il numero minimo di rami utili garantiti è pari a 8. Per circa il 60 % delle posizioni abbiamo che il sistema funziona col massimo numero di rami. In figura 5.30 viene mostrata la copertura a massimo numero di rami utili in funzione alla potenza trasmessa dalle RAU. I punti in rosso rappresentano il valore percentuale di copertura a 9 rami delle immagini viste nei grafici precedenti, relative ai rami utili. Dalla curva è possibile risalire al valore di potenza in trasmissione

necessaria per garantire la massima copertura con 9 rami utili, si può vedere che tale valore è di circa 1,5 dBm.

Rami utili su 9 per posizione con potenza di Tx delle RAU di 0 dBm e distanza fra le RAU di 20 m



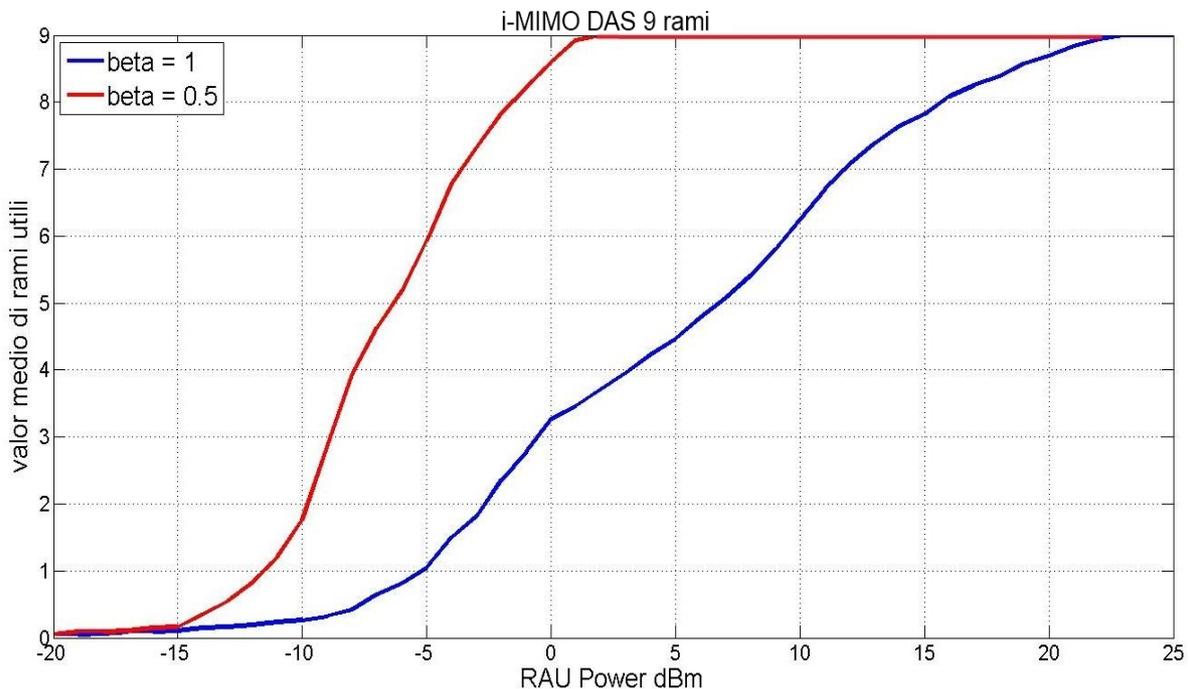
**Figura 5.29:i-MIMO DAS 9 rami con potenza delle RAU di 0 dBm**



**Figura 5.30:copertura percentuale a massimo numero di rami utili  
i-MIMO DAS 9 rami**

### 5.2.2.2.3 Valutazione sul numero medio di rami utili e inutili

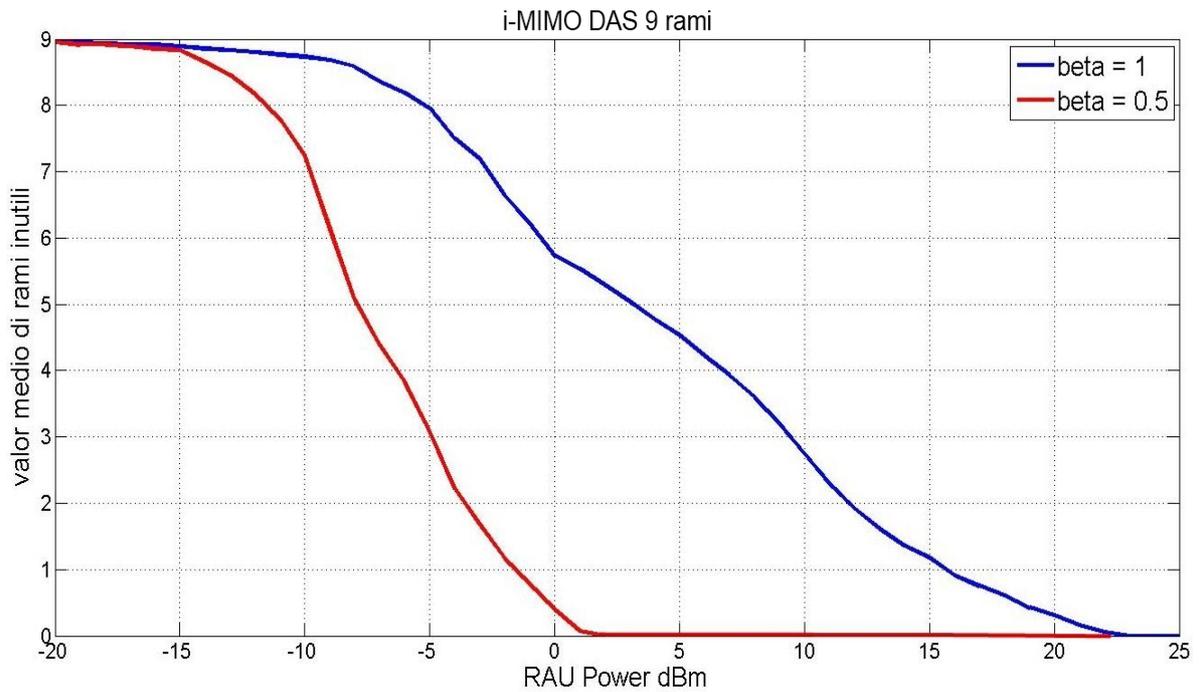
Andiamo ora a valutare il valor medio di rami utili/inutili in funzione della potenza trasmessa dalle RAU, nel caso di pianificazione DAS MIMO 9 rami. Come per i casi precedentemente studiati utilizzeremo due valori di  $\beta$  mentre  $\alpha = 2$  fisso. In figura 5.31 viene mostrato il grafico appena descritto riguardante il valor medio di rami utili per il sistema DAS MIMO 9 rami.



**Figura 5.31: valor medio rami utili i-MIMO DAS 9 rami**

Per la curva calcolata con  $\beta = 0.5$  il valore massimo di funzionamento è raggiunto ad una potenza delle RAU di 2 dBm circa, che corrisponde al valore trovato nel grafico della percentuale di copertura in figura 5.30. Considerando il caso con  $\beta = 1$  vediamo che per raggiungere un valor medio di rami utili pari a 9, le antenne distribuite devono trasmettere con una potenza superiore ai 20 dBm. Ricordando le normative in termini di potenza emessa in ambienti

indoor citate nel paragrafo 1.5.1 del capitolo 1, precisiamo che le antenne non possono irradiare più di 20 dBm di potenza. Se dovessimo pianificare un sistema DAS MIMO 9 rami in un ambiente molto attenuato con un  $\beta \approx 1$ , per far sì che il sistema funzioni bene ad una potenza in trasmissione di 20 dBm dovremo avvicinare le RAU rispetto ai 20 m usati per i nostri calcoli di pianificazione.



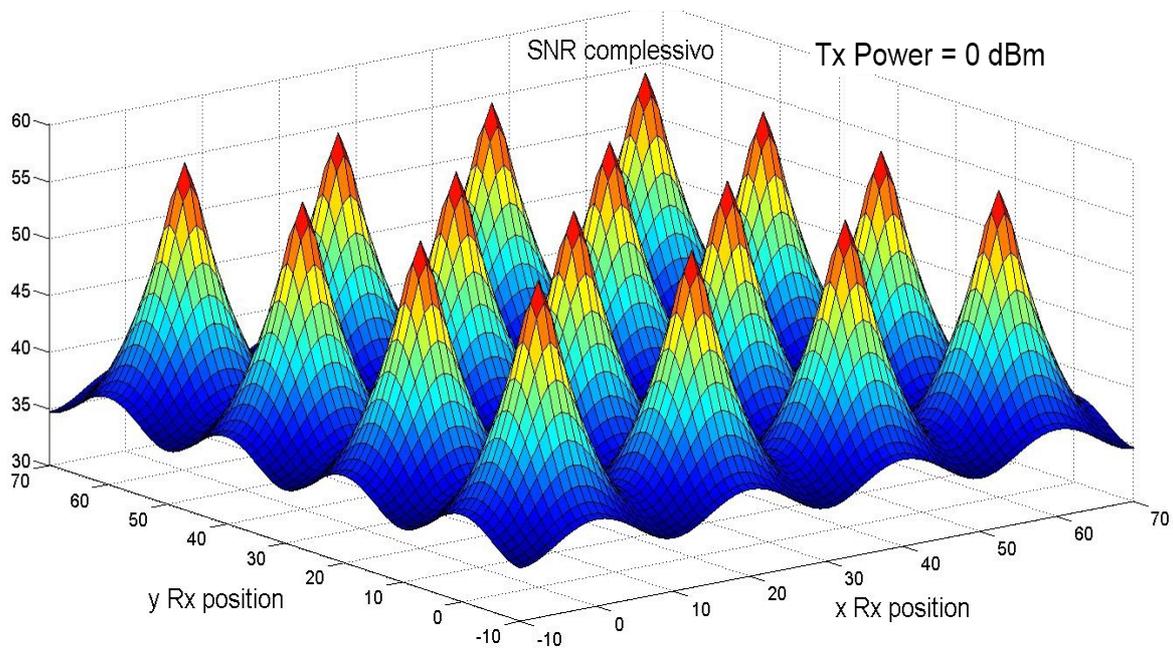
**Figura 5.32: valor medio rami inutili i-MIMO DAS 9 rami**

In figura 5.32 viene mostrato il grafico riguardante il numero di rami inutili, da questo possiamo ricavare facilmente i valori di potenza da utilizzare per portare il sistema al funzionamento ottimale.

## 5.2.2.4 i-MIMO DAS 16 rami

### 5.2.2.4.1 Superficie di rapporto segnale rumore

In figura 5.27 è mostrato il SNR complessivo per una pianificazione i-MIMO DAS a 16 rami per valori di  $\alpha = 2$  e  $\beta = 0.5$ .



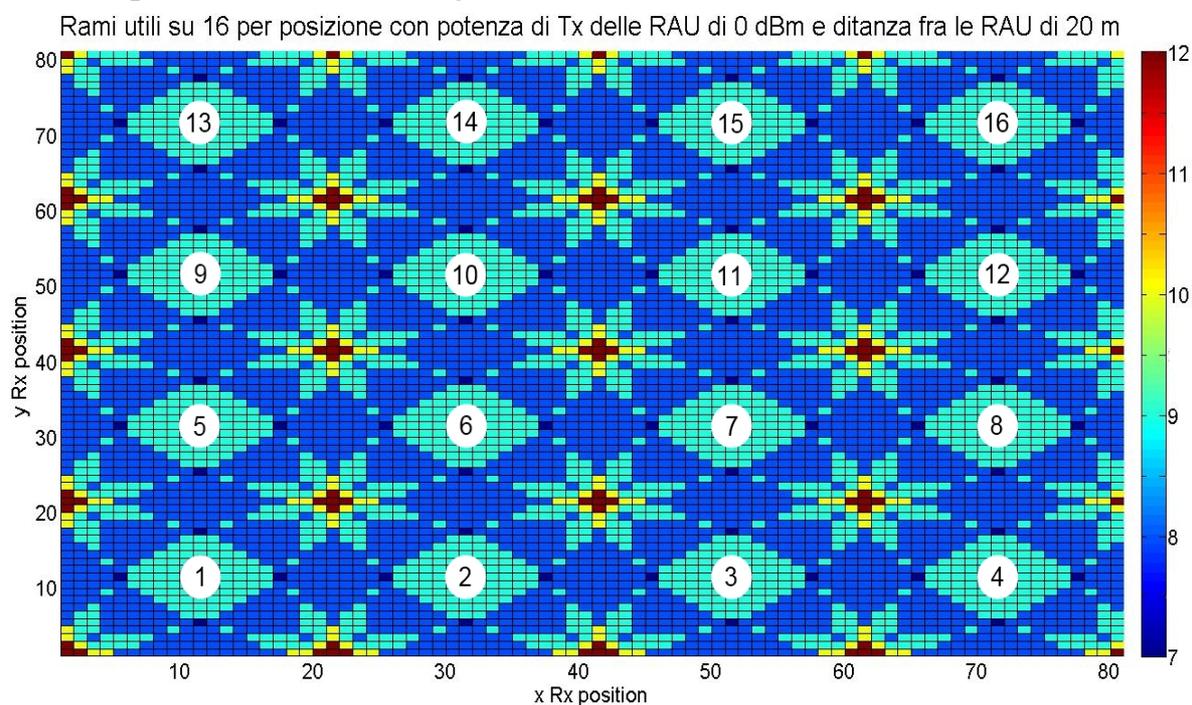
**Figura 5.33: SNR complessivo i-DAS MIMO 16 rami con potenza delle RAU di 0 dBm**

Anche per il caso a 16 rami con una potenza di trasmissione delle RAU di 0 dBm il valore di SNR non scende sotto la soglia dei 30 dB. Per sistemi di quest'ordine le dimensioni del cluster sono notevoli, come da pianificazione la distanza fra le antenne è fissata a 20 m, quindi la struttura complessiva ricopre un'area di 80 m<sup>2</sup>.

### 5.2.2.4.2 Grafici di copertura rami utili

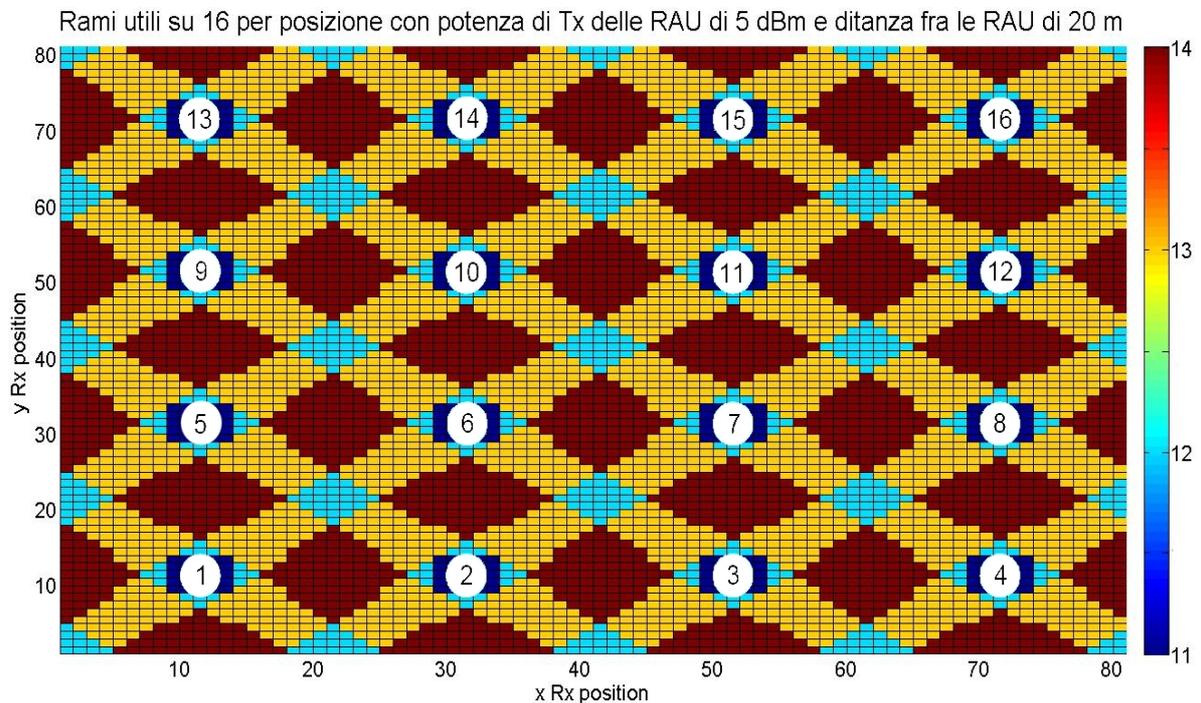
Premettiamo che sistemi di quest'ordine sono stati presi come casi di studio per poterne valutare le condizioni di funzionamento, questo perché gli standard attuali non permettono la gestione di sistemi così complessi. Lo standard LTE gestisce al massimo sistemi MIMO 4x4,

per poter usufruire di sistemi con più rami si deve far riferimento allo standard LTE advanced, che consente la gestione di sistemi MIMO 8x8 in downlink. Andiamo ora a valutare, come per i casi precedentemente studiati, le superfici di copertura dei rami utili in base alla potenza trasmessa dalle RAU per valori di  $\alpha = 2$  e  $\beta = 0.5$ , per la pianificazione a 16 rami. In figura 5.34 la potenza trasmessa dalle antenne distribuite è di 0 dBm, per tale valore la scala a destra dell'immagine mostra che il numero minimo di rami utili è pari a 7, mentre il numero massimo è di 12 rami. In queste condizioni il sistema i-MIMO DAS 16 rami non è sfruttato a dovere, perciò per poter ottenere risultati di copertura migliori, si deve aumentare la potenza in trasmissione delle antenne distribuite, in modo che il ricevitore spostandosi, possa sempre sentire ogni ramo del sistema con una potenza sufficiente a garantire il suo funzionamento.



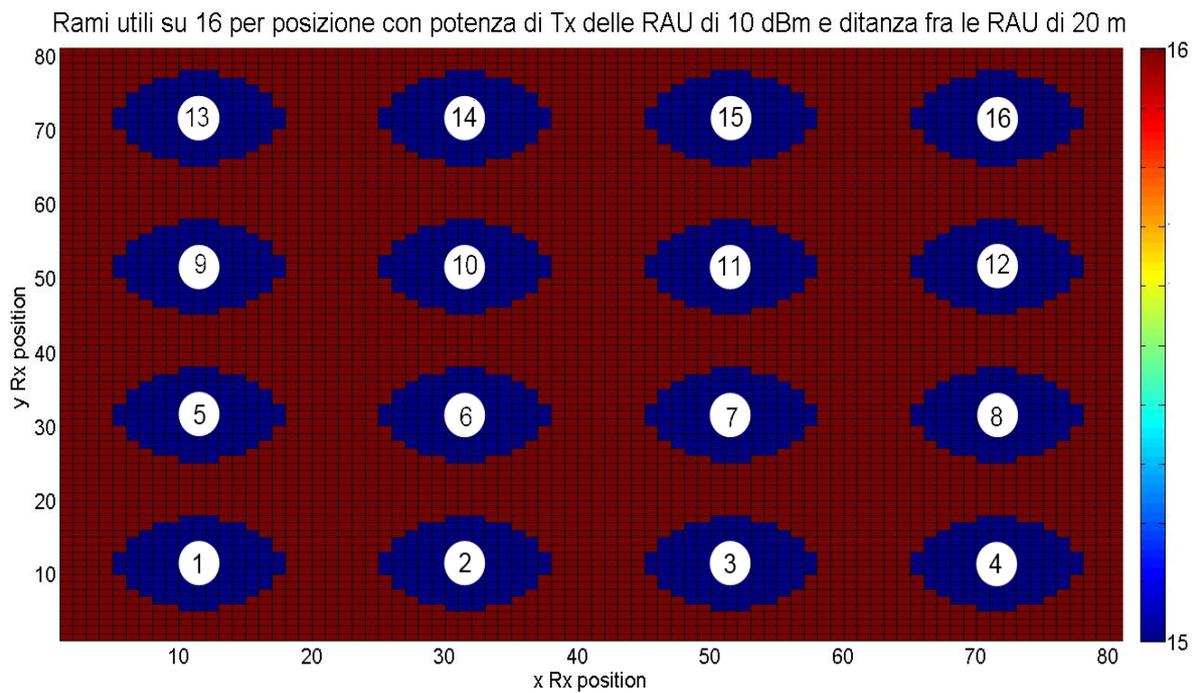
**Figura 5.34: i-MIMO DAS 16 rami con potenza delle RAU di 0 dBm**

Aumentando la potenza in trasmissione a 5 dBm si ottiene la situazione in figura 5.35, si nota subito che il numero di antenne che il ricevitore sente con almeno 15 dB di potenza, sopra la soglia di rumore è pari a 11. Le zone di ricezione situate a una distanza intermedia fra le RAU sono quelle in cui il numero di rami utili è superiore, questo perché si ha uno sbilanciamento di potenze minore. I punti in rosso sono quelli in cui ho 14 rami sopra la soglia dei 15 dB.

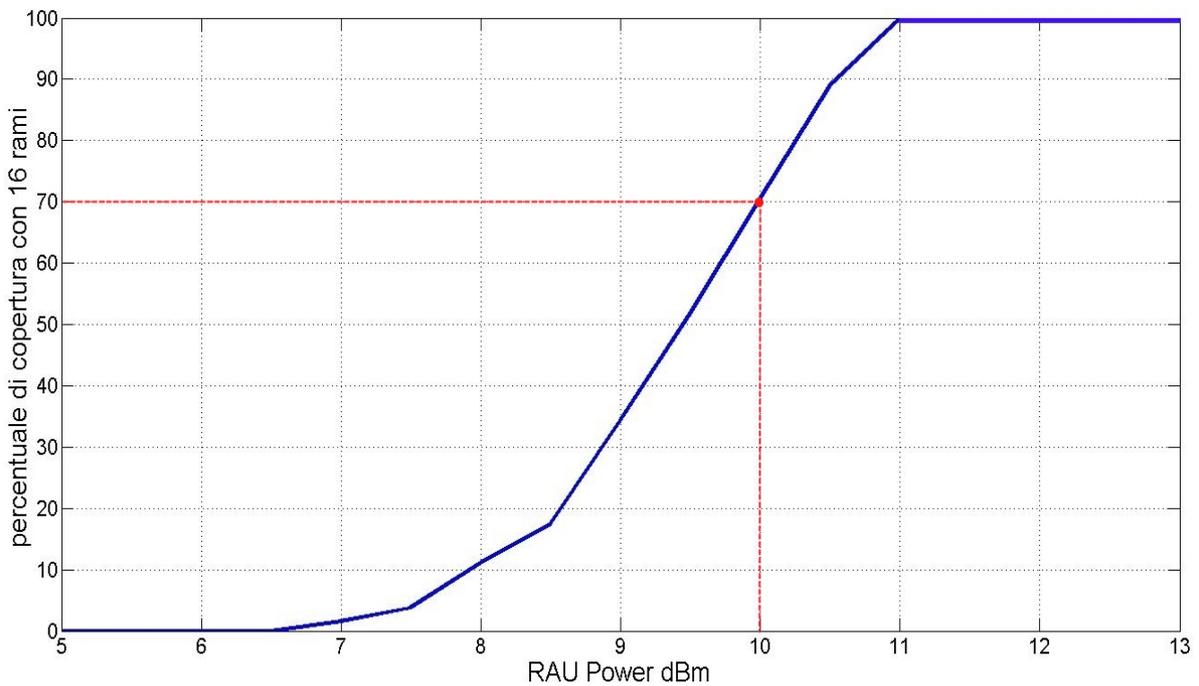


**Figura 5.35: i-MIMO DAS 9 rami con potenza delle RAU di 5 dBm**

Aumentando la potenza in trasmissione delle RAU fino ad arrivare a 10 dBm, si può notare in figura 5.36 che il sistema si avvicina al funzionamento ottimale, cioè a poter sfruttare tutti i 16 rami disponibili. La potenza necessaria ad ottenere una perfetta copertura sarà leggermente superiore a quella del caso sopra descritto. Per la comprensione delle immagini si devono associare i colori sono con i valori della barra laterale.



**Figura 5.36: i-MIMO DAS 9 rami con potenza delle RAU di 10 dBm**



**Figura 5.37:copertura percentuale a massimo numero di rami utili  
i-MIMO DAS 16 rami**

La figura 5.37 riassume l'andamento della copertura a massimo

numero di rami utili, in funzione della potenza di trasmissione delle RAU calcolato per  $\alpha = 2$   $\beta = 0.5$ . Come è possibile osservare, la potenza necessari a garantire un funzionamento ottimale e quindi una copertura uniforme con 16 rami utili è di circa 11 dBm. Il valore percentuale di copertura raggiunto con una potenza di 10 dBm, caso di figura 5.36, è pari al 70% dell'area del cluster. Per quanto riguarda il calcolo del valor medio di rami utili/inutili del sistema in esame, non è stato calcolato per questioni di tempo di calcolo che il simulatore impiegherebbe per ottenere i risultati.

### 5.2.3 Interleaved MIMO DAS 8 rami

#### 5.2.3.1 Pianificazione

La copertura del ambiente è stata fatta mediante l'utilizzo di celle quadrate, come per i casi bidimensionali studiati in precedenza. Per il sistema preso in considerazione, avente un array di trasmissione composto da otto rami, si ha un cluster rettangolare che è composto come in figura 5.38.



**figura 5.38: cluster size i-MIMO DAS 8 rami**

Le RAU sono posizionate al centro della cella, distano 20 metri l'una dall'altra e sono poste ad un'altezza di 3 metri, mentre il piano di ricezione è situato ad 1,5 metri. La copertura dell'ambiente viene eseguita ripetendo il cluster, in modo da formare una struttura chiusa a

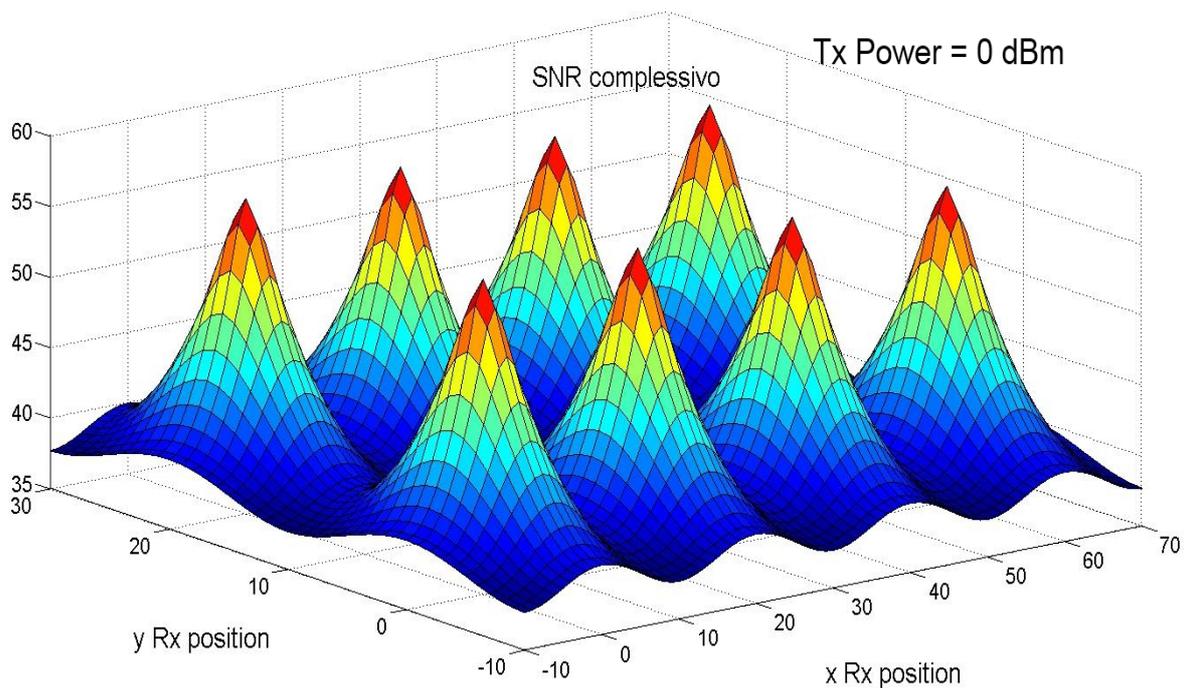
matrice di cluster di dimensioni 7x7. Dato che la struttura del cluster è rettangolare, quindi non simmetrica come quella quadrata, si è pensato di testare una pianificazione traslata. Nel caso bidimensionale a due rami, avevamo scambiato la posizione delle due RAU nelle righe dispari della matrice di cluster, questo accorgimento ha portato ad un netto miglioramento della copertura. Anche per il sistema a 8 rami è stato introdotto uno shift ciclico di due posizioni delle RAU, nelle sole righe dispari della matrice di cluster 7x7, così da ottenere una struttura a scacchiera. In figura 5.39 è mostrato una porzione della matrice di cluster. La modifica introdotta induce un miglior interlacciamento dei rami e quindi a una miglior copertura dell'ambiente considerato. Nel paragrafo riguardante il valor medio di rami utili metteremo a confronto la pianificazione traslata con quella non traslata e ne valuteremo i risultati. Come abbiamo fatto fin ora la superficie su cui andremo a effettuare le misure è quella relativa al cluster che è posto al centro della struttura pianificata. Per quanto riguarda i modelli di propagazione sono gli stessi visti nel caso lineare nel paragrafo 5.1.1.

7	8	5	6	7	8	5	6
3	4	1	2	3	4	1	2
5	6	7	8	5	6	7	8
1	2	3	4	1	2	3	4
7	8	5	6	7	8	5	6
3	4	1	2	3	4	1	2

**figura 5.39: porzione della matrice di cluster traslata**

### 5.2.3.2 Superfici di rapporto segnale rumore

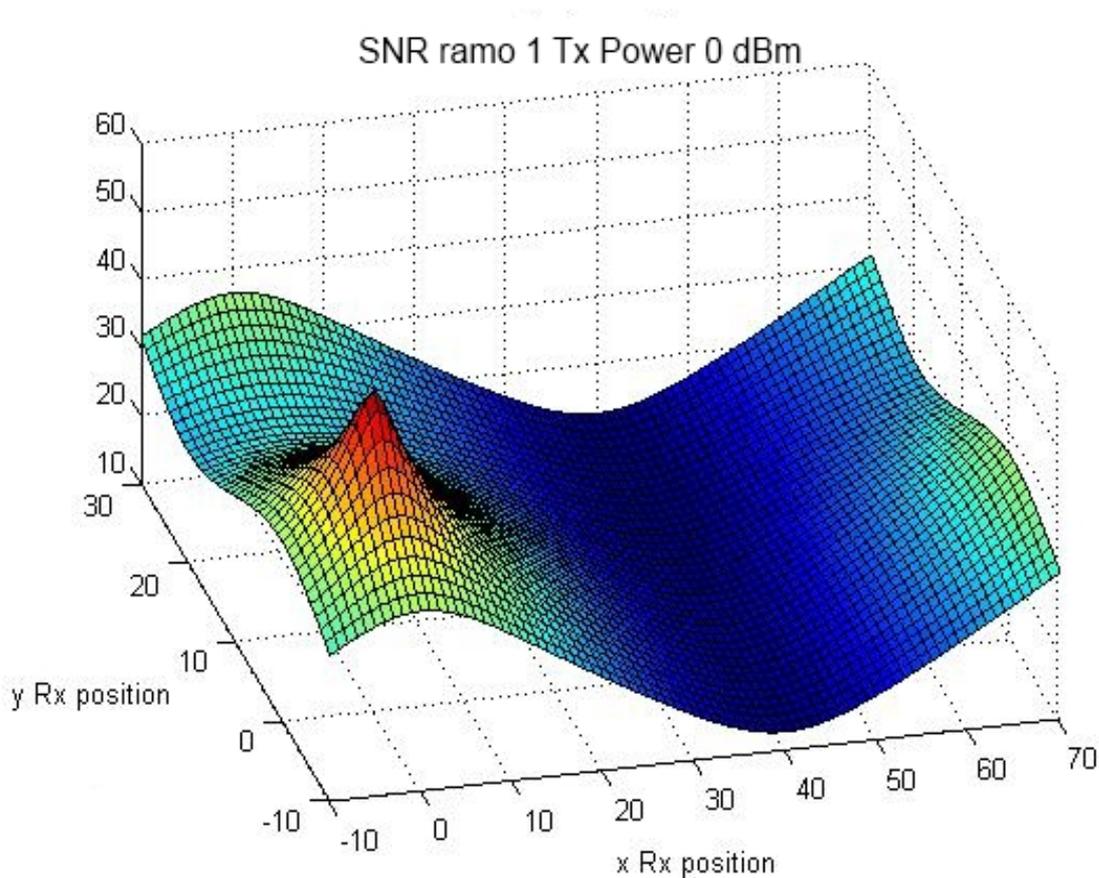
Andiamo ora ad analizzare la superficie di rapporto segnale rumore complessivo per il caso di pianificazione I-DAS MIMO a 8 rami. In figura 5.40 è mostrata la superficie di SNR complessivo, con una potenza in trasmissione delle RAU di 0 dBm per  $\alpha = 2$   $\beta = 0.5$ , la superficie di SNR complessivo è la stessa sia per la pianificazione interleaved sia per quella senza shift ciclico dei cluster.



**Figura 5.40: SNR complessivo i-DAS MIMO 8 rami con potenza delle RAU di 0 dBm**

La differenza tra le due pianificazioni si può osservare se si va a considerare il SNR relativo ad un singolo ramo del sistema distribuito. Consideriamo la pianificazione semplice senza alcuno shift ciclico dei cluster. In figura 5.41 è mostrato il SNR corrispondente al ramo 1 nell'area di scansione relativa al cluster centrale. Il punto in cui è presente il picco di SNR corrisponde alla posizione del ramo 1 del

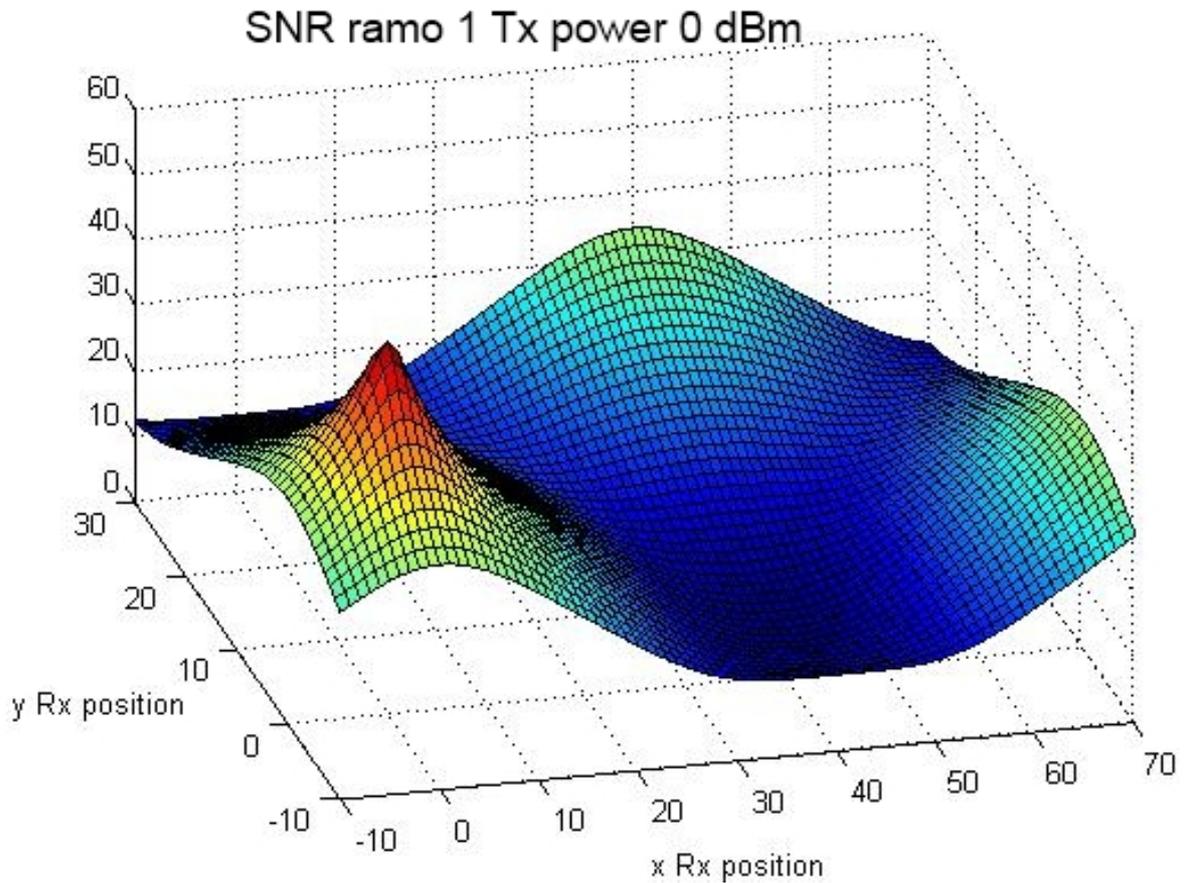
cluster centrale, mentre le due zone azzurre rialzate ai bordi del rettangolo, corrispondono ai punti che sono vicini alle antenne del ramo 1 appartenenti ai cluster adiacenti.



**Figura 5.41:SNR ramo 1 Pianificazione non traslata**

Consideriamo ora la pianificazione traslata che tiene conto dello shift ciclico dei cluster. Prendiamo come riferimento sempre il ramo 1 del sistema; nella superficie del SNR esso avrà il suo picco nella stessa posizione del non interleaved. Se si considerano le ripetizioni adiacenti al cluster centrale, quelle che sono collocate sopra e sotto ad esso, hanno il ramo 1 spostato di due posizioni a destra rispetto alla posizione del picco, ciò fa cambiare la superficie di SNR. In figura 5.42 è mostrata la superficie di SNR della pianificazione traslata

riferita al ramo 1 con una potenza di trasmissione delle RAU di 0 dBm e un  $\beta = 0.5$ .



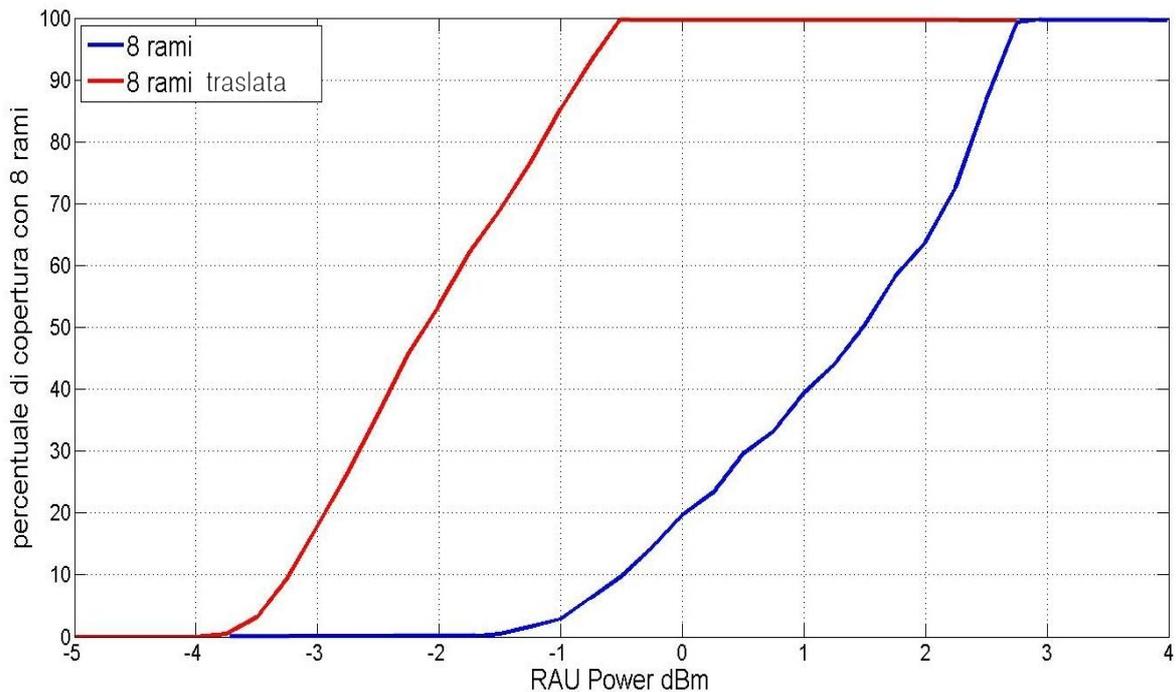
**Figura 5.35: SNR ramo 1 pianificazione traslata**

Le due pianificazioni si differenziano per il tipo di copertura fornita dai rami del sistema; in seguito valuteremo quale delle due soluzioni fornisce una prestazione migliore in termini di valor medio di rami utili forniti all'utente.

### **5.2.3.3 Grafici di copertura rami utili**

Nel caso a 8 rami si sono valutate due tipologie di pianificazione, dai risultati che mostreremo successivamente possiamo già dire che la struttura a sacchiera è risultata la migliore. Prima di mostrare i grafici

di copertura relativi ai rami utili per la sola pianificazione traslata, vediamo le curve che mostrano la percentuale di copertura a massimo numero di rami utili. Tali curve sono mostrate in figura 5.36 e sono ricavate come per i casi precedentemente studiati, dalle matrici utilizzate per il plot dei grafici di copertura.

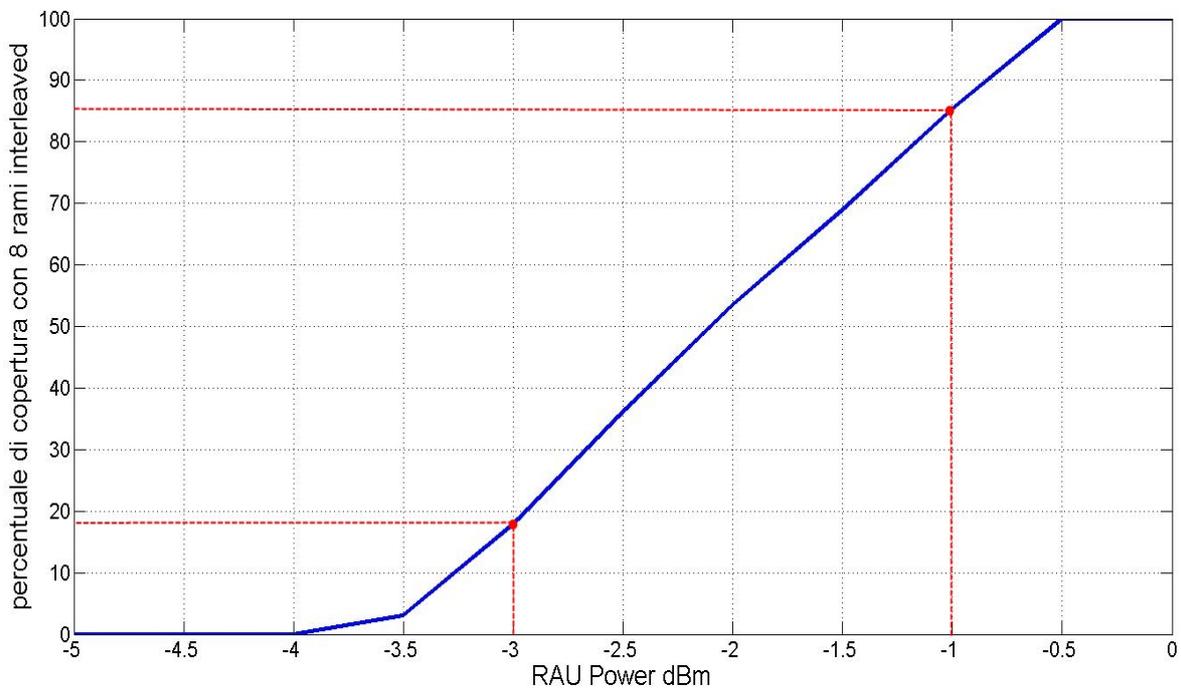


**Figura 5.36: confronto copertura percentuale con 8 rami utili**

Il risultato ottenuto mostra che la pianificazione traslata è quella che raggiunge per prima la percentuale di copertura massima. Si può concludere che la pianificazione migliore è quella a scacchiera, che è rappresentata dalla curva che con minor potenza in trasmissione permette di ottenere il massimo della copertura. Andiamo ora a valutare le superfici di copertura dei rami utili, in base alla potenza trasmessa dalle RAU per la pianificazione traslata. In figura 5.37 è mostrata la superficie di copertura dei rami utili con una potenza di trasmissione delle RAU di -3 dBm per valori di  $\alpha = 2$  e  $\beta = 0.5$ . Per



In figura 5.39 si utilizza una potenza di trasmissione delle RAU di  $-1$  dBm, si può notare che la superficie coperta con 8 rami ha occupato quasi tutto il cluster di misura. I punti in cui vi sono 7 rami utili sono quelli in cui la potenza ricevuta da un ramo è inferiore alla soglia dei 15 dB. Riproponiamo in figura 5.40 la curva della copertura percentuale mostrata nel confronto all'inizio del paragrafo, sono stati evidenziati le percentuali di copertura con 8 rami utili per i due casi mostrati in figura 5.38 e 5.39. A  $-0.5$  dBm di potenza si raggiunge il 100 % di copertura, che rappresenta il funzionamento ottimale.

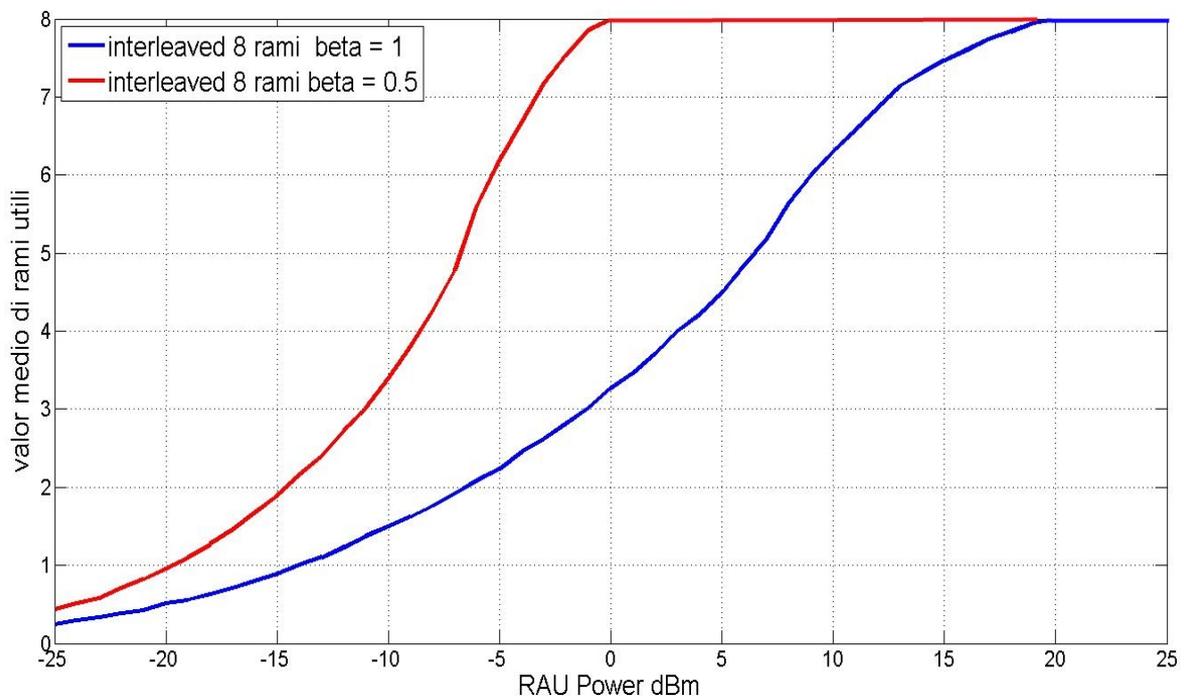


**Figura 5.40: copertura percentuale a massimo numero di rami utili i-MIMO DAS 8 rami**

#### 5.2.3.4 Valutazione sul numero medio di rami utili e inutili

Andiamo ora a valutare il valor medio di rami utili/inutili in funzione della potenza trasmessa dalle RAU, nel caso di pianificazione traslata i-MIMO DAS 8 rami. Come per i casi precedentemente studiati

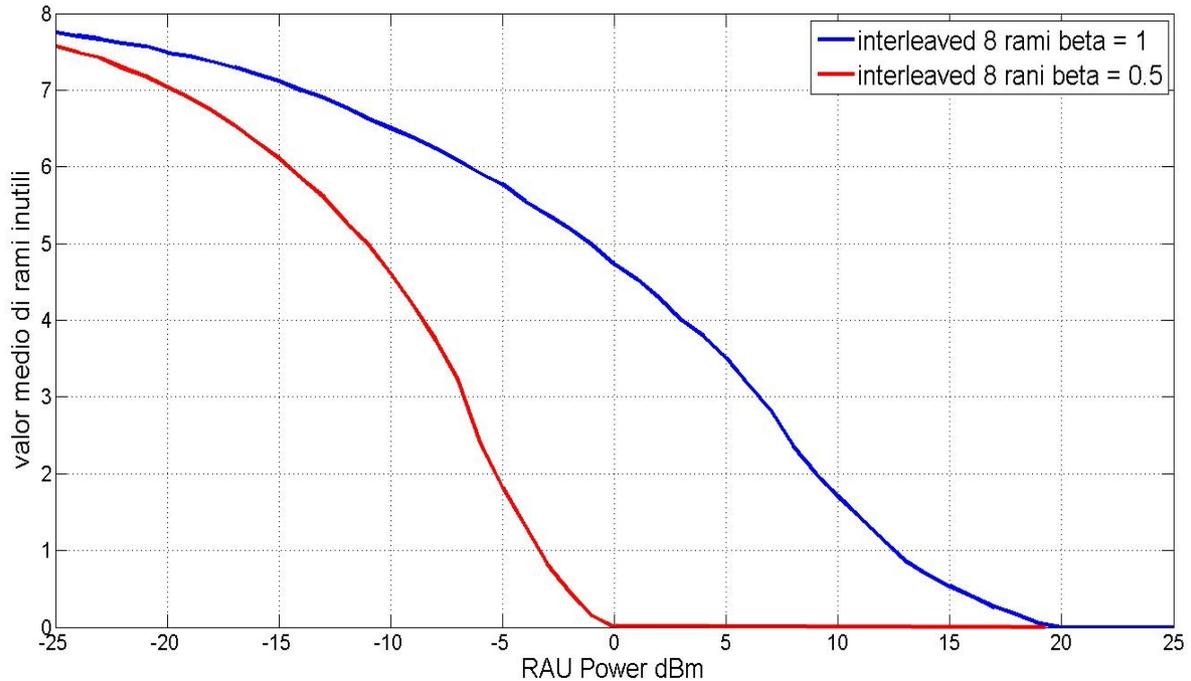
utilizzeremo due valori di  $\beta$  mentre  $\alpha = 2$  fisso. In figura 5.41 viene mostrato il grafico riguardante il valor medio di rami utili, nelle due condizioni di propagazione, che sono discriminate dal valore di  $\beta$ . La curva calcolata per  $\beta = 1$  mostra che la potenza di trasmissione delle antenne remote utile al raggiungimento di 8 rami funzionanti è di circa 20 dBm, mentre con un attenuazione inferiore  $\beta = 0.5$ , la potenza necessaria è di circa 0 dBm. Fra le due curve vi è una notevole differenza, quindi possiamo concludere che il funzionamento del sistema dipende molto dalle ambiente di propagazione.



**Figura 5.41: valor medio rami utili i-MIMO DAS 8 rami**

In figura 5.42 è mostrato il grafico del valor medio di rami inutili riferiti alla pianificazione traslata i-MIMO DAS 8 rami. Tale grafico mostra ciò che abbiamo già visto per il valor medio di rami utili, ma considerando il valor medio di rami inutili che ci fa capire meglio quanti rami del sistema non apportano contributo valido alla

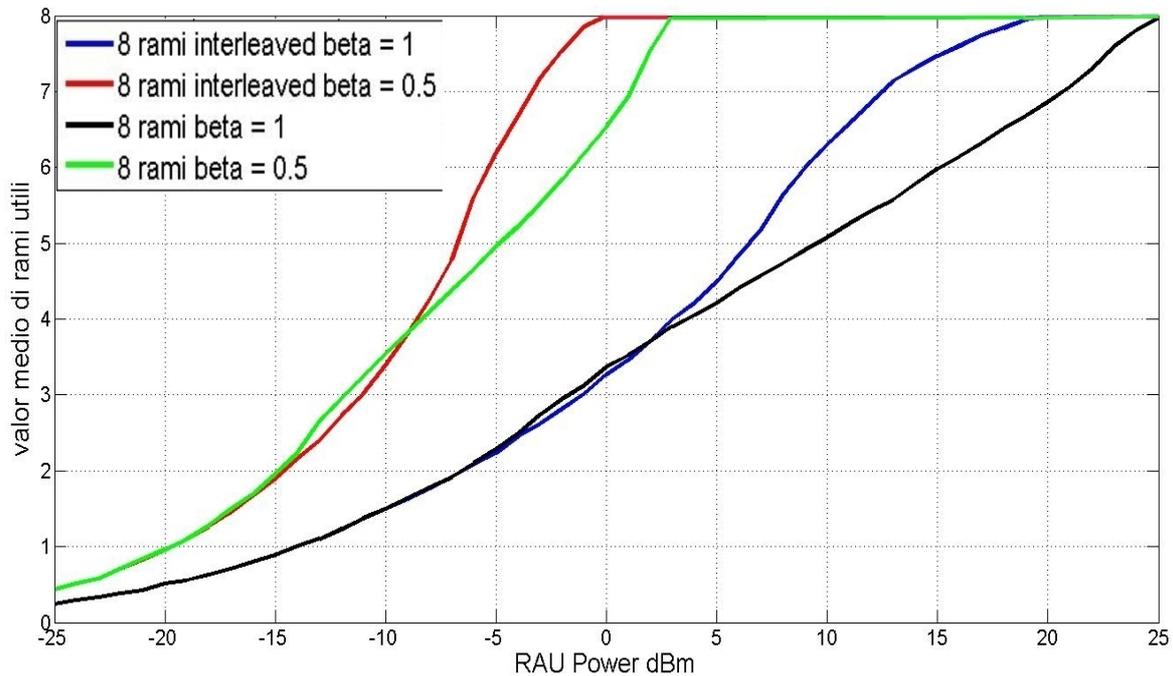
trasmissione. Entrambi i grafici sul valor medio di rami possono essere utilizzati per estrapolare le specifiche di progetto, come la potenza a cui devono trasmettere le RAU, che cambia al variare del valore di  $\beta$  considerato.



**Figura 5.42: valor medio rami inutili i-MIMO DAS 8 rami**

Abbiamo già dimostrato che la pianificazione traslata è quella che fornisce una miglior copertura in termini di area servita e, ora mettiamo a confronto il valor medio di rami utili per la pianificazione traslata con la pianificazione in cui non sono applicate traslazioni dei cluster. Il confronto appena descritto è mostrato in figura 5.43, sono state confrontate le curve calcolate per  $\beta = 0.5$  e  $\beta = 1$ . Vediamo che in entrambi i casi di  $\beta$  le curve hanno lo stesso tipo di comportamento. Per potenze di trasmissione basse si ha che il valor medio di rami utili della pianificazione traslata risulta sovrapposto o leggermente peggiore del caso non traslato. Questo comportamento è inaspettato ma da

considerarsi non più di tanto rilevante ai fini della pianificazione; dato che per potenze così basse il numero di rami utilizzabili si riduce notevolmente. Il comportamento delle curve graficate cambia quando si considerano potenze di trasmissione ottimali per il funzionamento del sistema. A tali condizioni, la pianificazione traslata prevale apportando un contributo apprezzabile alla copertura in termini di rami utili garantiti all'utente.



**Figura 5.43: confronto valor medio rami utili pianificazione i-DAS MIMO 8 rami traslata e non al variare di  $\beta$**

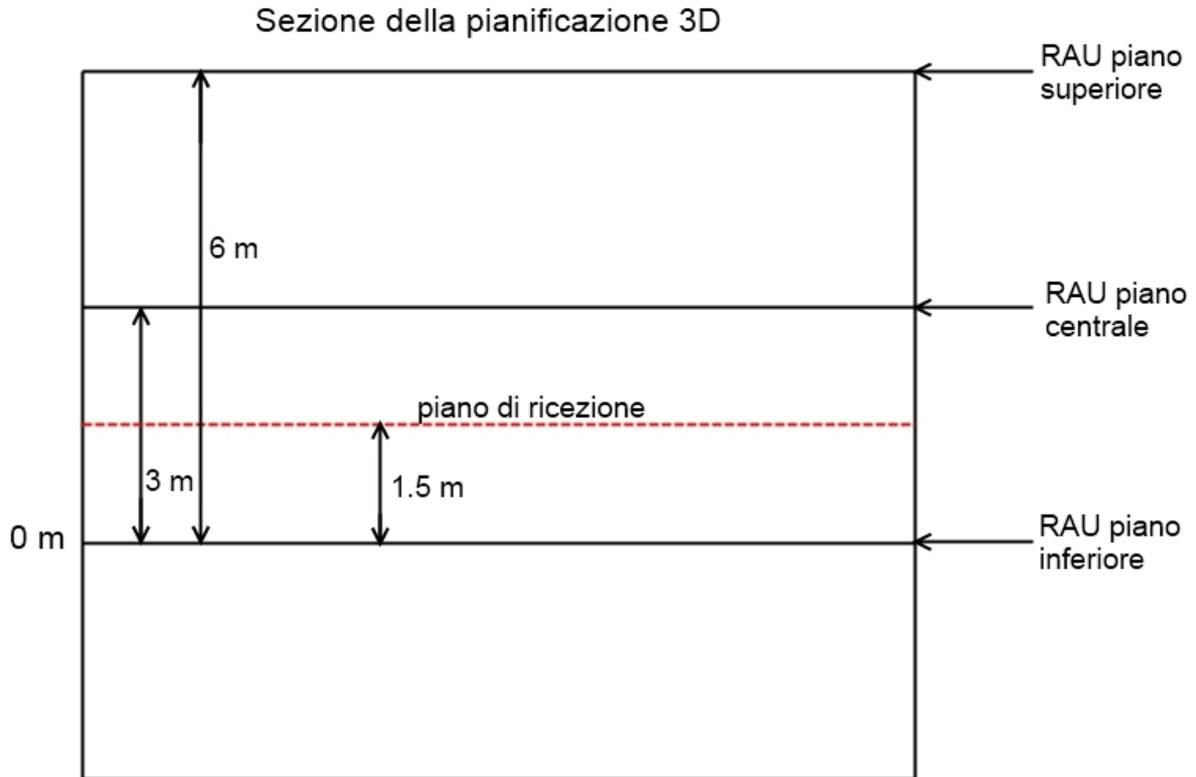
## **5.3 Cenno al caso Tridimensionale**

### **5.3.1 Interleaved MIMO DAS 4 rami**

#### **5.3.1.1 Pianificazione**

Si è voluto fare un cenno alla pianificazione di un sistema che tiene in considerazione la presenza di altri piani di un edificio, in cui possono essere dislocate le antenne trasmittenti. Si è preferito utilizzare per la pianificazione, un sistema interleaved MIMO DAS a quattro rami per poterlo confrontare col caso medesimo bidimensionale e poterne valutare i vantaggi. Nel problema specifico la struttura creata nel programma di pianificazione, è composta da tre piani: uno inferiore, uno centrale ed uno superiore. Nel piano centrale la pianificazione è la copia esatta del caso bidimensionale, in cui le antenne distribuite stanno al centro di celle quadrate che compongono a sua volta un cluster della medesima forma. La struttura complessiva di un piano è fatta come matrice di cluster di dimensione  $7 \times 7$ . Le antenne distribuite distano 20 metri l'una dall'altra e sono disposte all'altezza di 3 metri rispetto al suolo. La superficie di misura è posizionata ad 1.5 metri di altezza, essa corrisponde alla area del cluster al centro della matrice  $7 \times 7$ . Il suolo del piano centrale costituisce il riferimento da cui si misurano tutte le distanze. Le antenne del piano inferiore sono poste a 0 metri, mentre quelle del piano superiore sono poste a un'altezza di 6 metri rispetto al riferimento. I contributi in potenza derivanti dalle antenne dislocate nel piano sottostante e nel piano sovrastante a quello centrale, sono calcolati mediante le formule della distanza utilizzate nei casi bidimensionali con l'aggiunta di un modello concentrato per l'attenuazione causata dall'attraversamento dei solai da parte del

segnale, tale modello introduce una riduzione di potenza pari a 10 dB. In figura 5.41 è mostrata la struttura appena descritta ed implementata nel programma matlab.

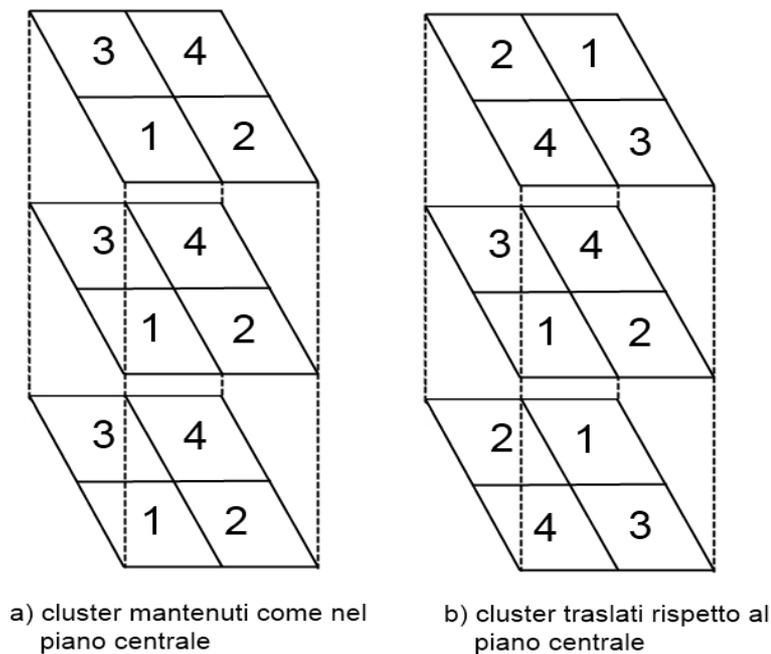


**Figura 5.41**

Per la pianificazione dei piani superiore ed inferiore si sono considerate due possibili soluzioni. La prima configurazione è mostrata in figura 5.42 a), le RAU dei cluster del piano sovrastante e del piano sottostante sono posizionate come quelle del piano centrale. In figura 5.42 b) è riportata la seconda soluzione, essa presenta una traslazione del piano superiore e di quello inferiore. In questo modo otteniamo una pianificazione traslata fra i piani dell'edificio. La posizione delle antenne remote è stata studiata in modo da avere una miglior copertura possibile. Facendo riferimento alla figura 5.42 b) se si considera la RAU 1 del cluster posto al piano centrale, abbiamo che

nei piani sopra e sotto di essa è posta la RAU 4, che nel piano centrale è quella situata a distanza maggiore dalla RAU 1. Dalla descrizione fatta potremmo sbilanciarci e dire che la versione traslata risulta essere migliore. Per avere conferma dell'assunzione fatta, le due pianificazioni verranno messe a confronto.

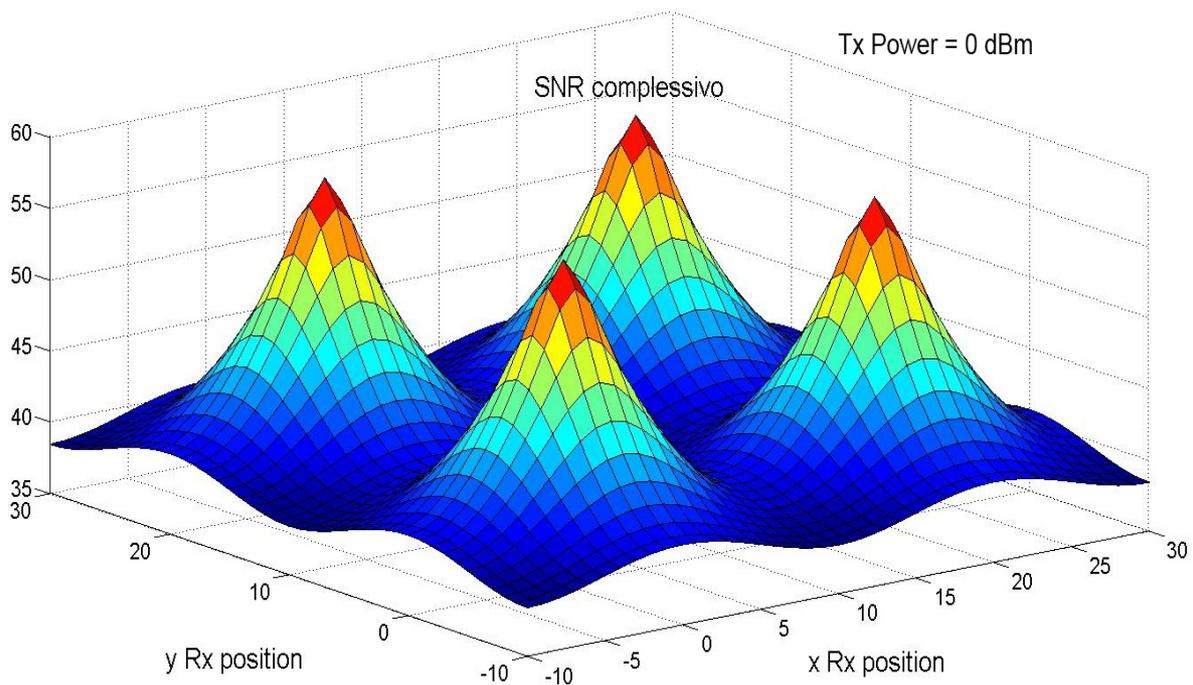
pianificazione dei cluster dei piani superiore e inferiore



**Figura 5.42**

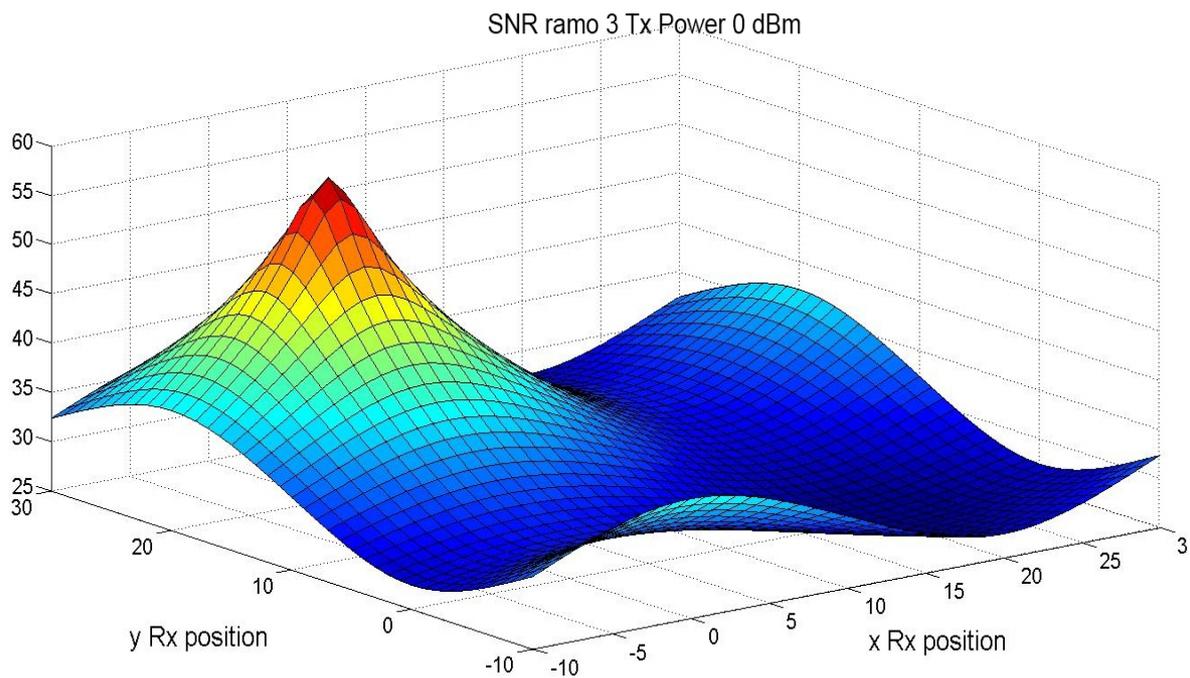
### 5.3.1.2 Superfici di rapporto segnale rumore

Valutiamo ora le superficie di SNR complessivo riferita al cluster posto al centro del piano intermedio. Indipendentemente dalla pianificazione scelta, traslata o non, il SNR complessivo non cambia, dato che le distanze fra le antenne non variano e le potenze emesse sono le stesse. In figura 5.43 è mostrato il SNR complessivo del sistema i-MIMO DAS 4 rami tridimensionale con una potenza di trasmissione delle RAU di 0 dBm e con coefficienti di attenuazione  $\alpha = 2$  e  $\beta = 0.5$ .

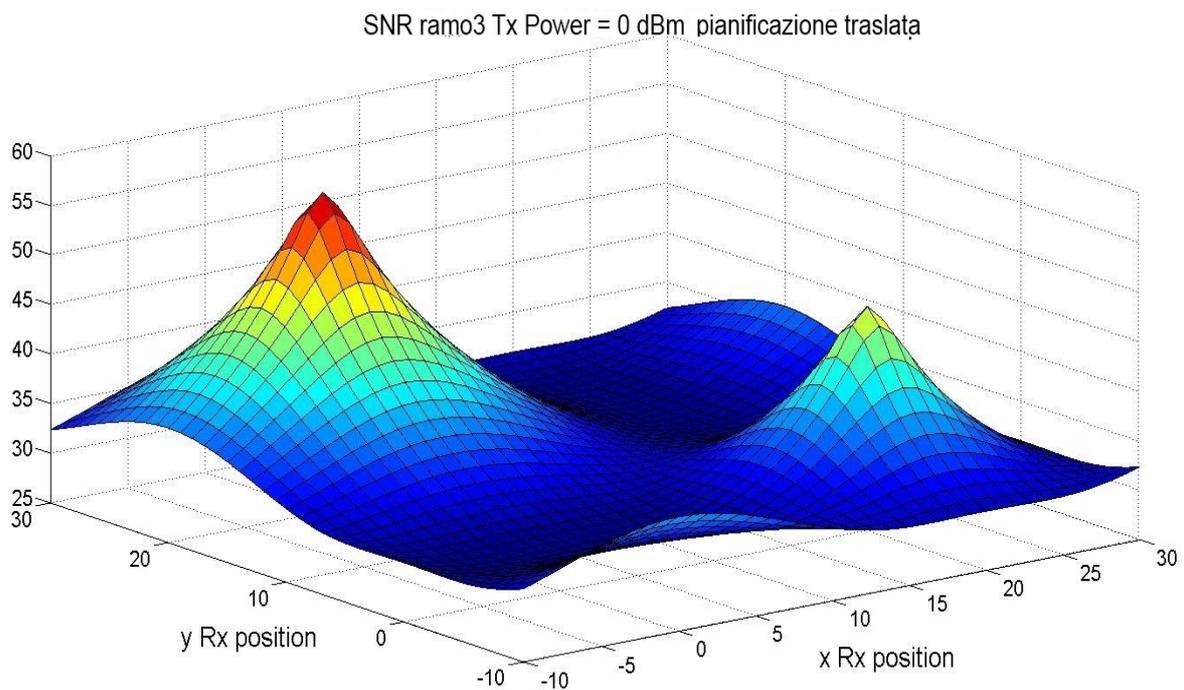


**figura 5.43: SNR complessivo i-DAS MIMO tridimensionale 4 rami con potenza delle RAU di 0 dBm**

Dal grafico sopra in figura possiamo dire che i valori di SNR complessivo sono superiori a quelli del caso bidimensionale e che quindi i contributi provenienti dai piani prossimi al piano centrale sono apprezzabili. La differenza fra la pianificazione traslata e non si evidenzia se andiamo a considerare il SNR relativo ad uno dei rami del MIMO. Valutiamo ora la pianificazione di figura 5.42. a), il caso non traslato, e andiamo a vedere il SNR relativo alla RAU 3 del cluster di misura. In esso sono considerati tutti i contributi in potenza derivanti dalle RAU 3 disposte nei tre piani dell'edificio; in figura 5.44 è mostrato il SNR appena descritto.



**Figura 5.44: SNR ramo 3 pianificazione non traslata**



**Figura 5.45: SNR ramo 3 pianificazione traslata**

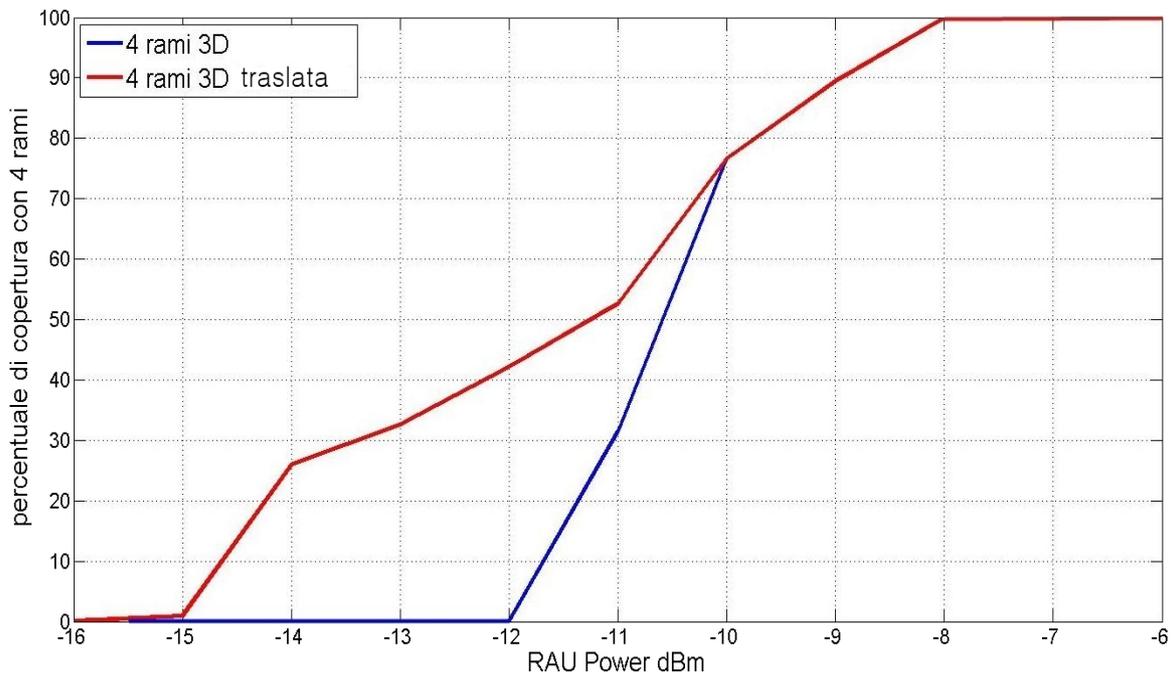
Ora consideriamo la pianificazione traslata di figura 5.42 b) e mostriamo in figura 5.45 il SNR del ramo 3 relativo al cluster di

misura. Anche in questo caso i contributi di potenza provengono da tutte le antenne omonime distribuite nei vari piani. Le due figure riguardanti i SNR del ramo 3, sono state inserite in modo da poter notare le differenze che la pianificazione scelta introduce nel SNR dei singoli rami. Confrontando le figure sul SNR del ramo 3 si vede che nella pianificazione traslata nasce un picco secondario. Questo è generato principalmente dalle RAU 3 dei cluster del piano inferiore e superiore che sono poste sopra e sotto di esso. Mentre il valore del picco principale, sarà leggermente superiore nella pianificazione non traslata, dove le antenne omonime dei cluster del piano inferiore e superiore sono poste esattamente sopra e sotto al picco principale. Le due pianificazioni mostrate si differenziano per il tipo di copertura fornita dai rami del sistema; in seguito valuteremo quale delle due soluzioni fornisce una prestazione migliore in termini di rami utili garantiti all'utente.

### **5.3.1.3 Grafici di copertura rami utili**

Nel caso tridimensionale a 4 rami si sono valutate due tipologie di pianificazione. Prima di mostrare i grafici di copertura relativi ai rami utili, vediamo le curve che mostrano la percentuale di copertura a massimo numero di rami utili nelle due differenti pianificazioni. Tali curve sono mostrate in figura 5.46 e sono ricavate come per i casi precedentemente studiati, dalle matrici utilizzate per il plot dei grafici di copertura. Il risultato ottenuto mostra un discreto miglioramento della pianificazione traslata per potenze di trasmissione delle antenne inferiori a -10 dBm. L'andamento cambia per valori di potenza superiori, infatti i profili risultano del tutto sovrapposti.

Probabilmente quando la potenza è bassa, i migliori valori sbilanciamento della pianificazione traslata sono sufficienti per aumentare il numero di rami utili. Nel caso in cui la potenza è alta, per recuperare l'ultimo ramo non utilizzabile (80% significa un solo ramo inutile su 4) ci vorrebbe un bilanciamento tale che anche il caso traslato non riesce a raggiungere. Quindi per potenze sopra i -10 dBm, la traslazione dei piani superiore ed inferiore non porta più vantaggi rispetto alla pianificazione coi piani non traslati.

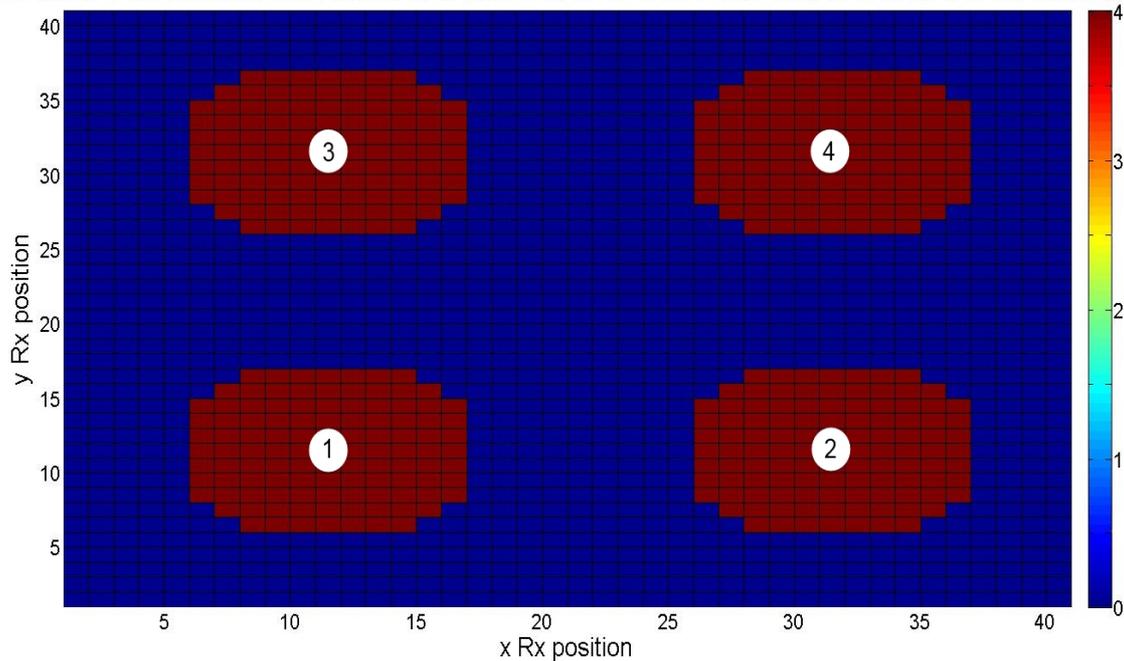


**Figura 5.46: confronto copertura percentuale con 8 rami utili**

Dal grafico sopra abbiamo conferma che la pianificazione traslata risulta sicuramente migliore rispetto al caso in cui i piani non vengono traslati. Andiamo ora a valutare alcuni casi delle superfici di copertura dei rami utili, in base alla potenza trasmessa dalle RAU per le due pianificazioni. In figura 5.47 è mostrata la superficie di copertura dei rami utili con una potenza di trasmissione delle RAU di dBm di -14 dBm per valori di  $\alpha = 2$  e  $\beta = 0.5$ , nell'immagine si può

notare che nelle posizioni vicino alle RAU vengono raggiunti 4 rami utili, questo risultato è da attribuire unicamente alla pianificazione traslata.

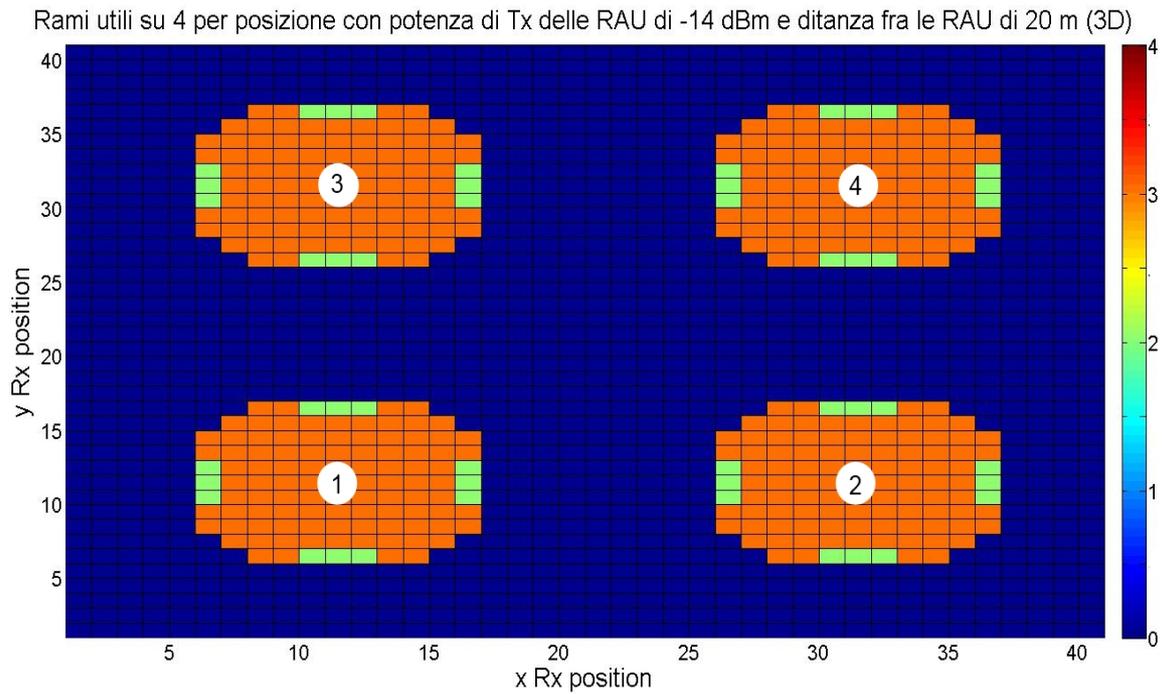
Rami utili su 4 per posizione con potenza di Tx delle RAU di -14 dBm e distanza fra le RAU di 20 m (3D Interleaved)



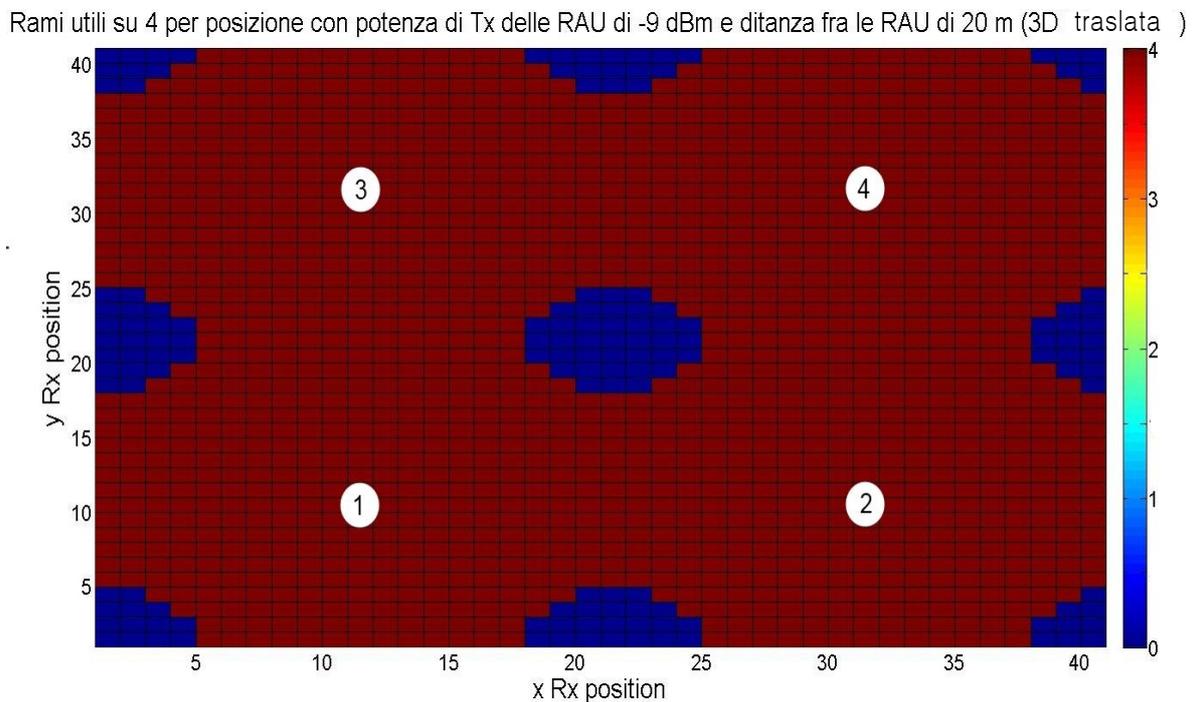
**Figura 5.47: pianificazione traslata i-MIMO DAS tridimensionale  
4 rami con potenza delle RAU di -14 dBm**

Il miglioramento è visibile se lo si confronta al caso con i piani non traslati mostrato in figura 5.48, anche in questo caso si utilizza una potenza di trasmissione delle antenne di -14 dBm.

Il colore rosso scuro nel grafico riguardante la pianificazione traslata di figura 5.47 indica la presenza di 4 rami utili, mentre nel caso dei piani non traslati di figura 5.48, ho al massimo 3 rami utili dove prima ne avevo 4. Da questo confronto è possibile osservare visivamente il vantaggio dato a potenze basse dalla pianificazione traslata.



**Figura 5.48: pianificazione non traslata i-MIMO DAS tridimensionale 4 rami con potenza delle RAU di -14 dBm**

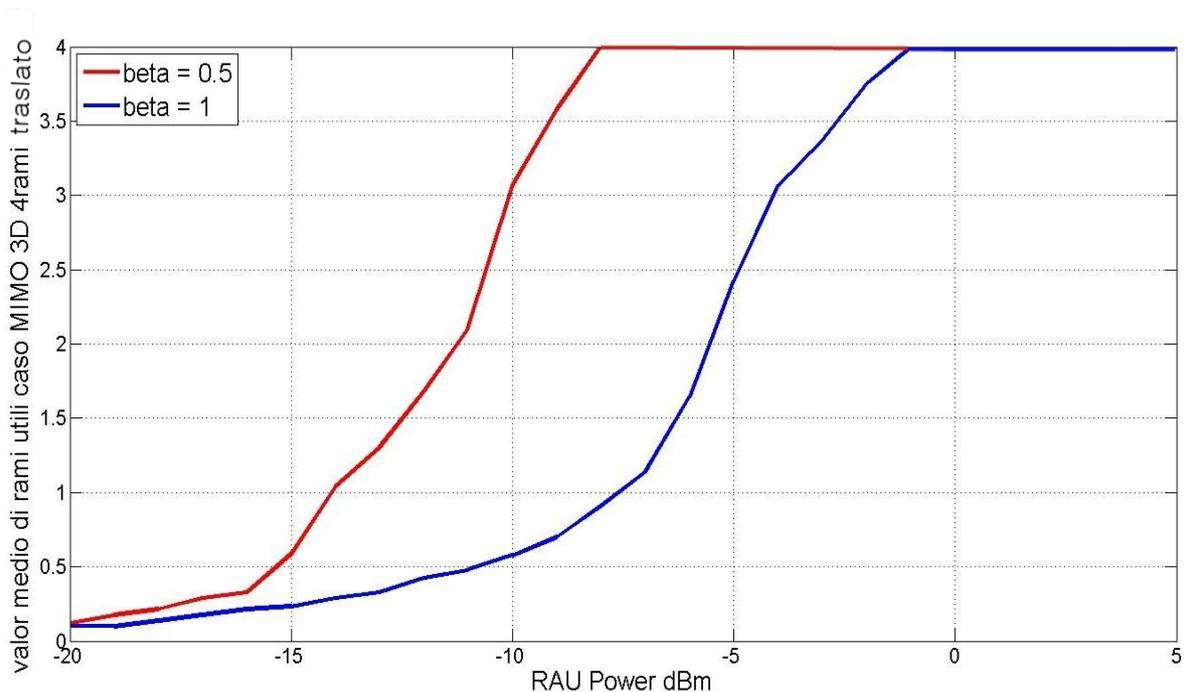


**figura 5.49: pianificazione traslata i-MIMO DAS tridimensionale 4 rami con potenza delle RAU di -9 dBm**

Per potenze di trasmissione maggiori le pianificazioni risultano equivalenti ai fini pratici. Infatti se consideriamo una potenza di trasmissione delle RAU di -9 dBm e grafichiamo la copertura dell'area sondata dal ricevitore otteniamo il risultato di figura 5.49. Ciò che otteniamo è lo stesso grafico per entrambe le pianificazioni.

#### 5.3.1.4 Valutazione sul numero medio di rami utili e inutili

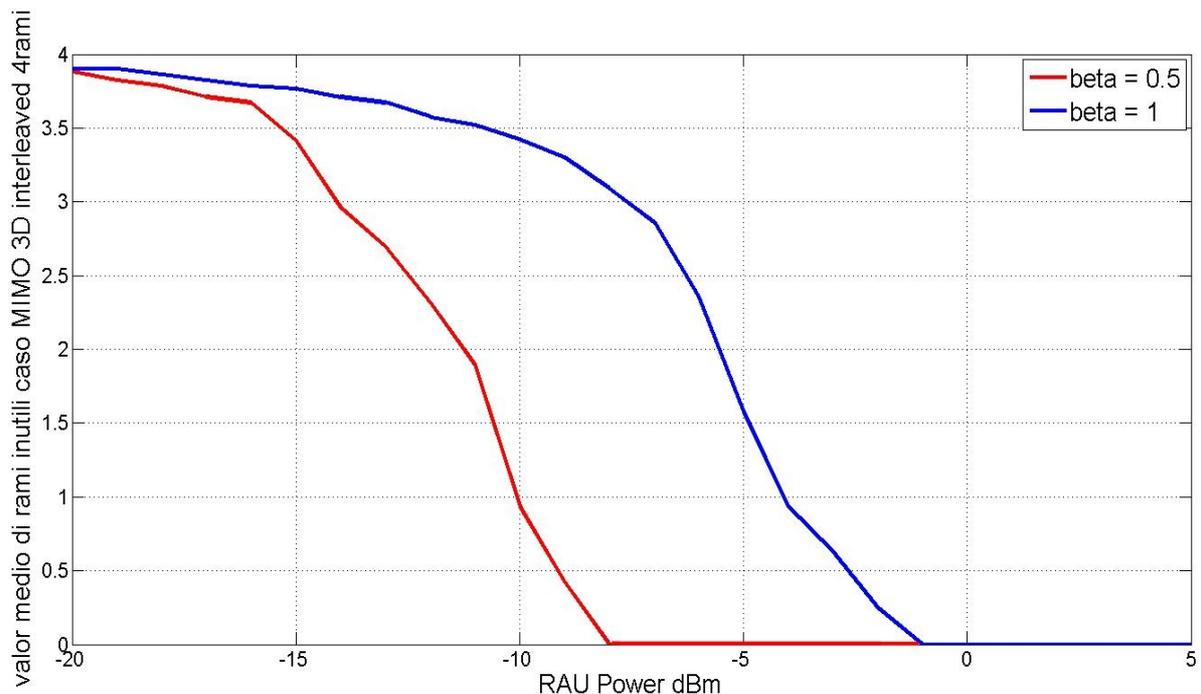
Andiamo ora a valutare il valor medio di rami utili/inutili in funzione della potenza trasmessa dalle RAU, nel caso di pianificazione traslata i-MIMO DAS 4 rami tridimensionale. Come per i casi precedentemente studiati utilizzeremo due valori di  $\beta$  mentre l'attenuazione di spazio libero  $\alpha = 2$ .



**Figura 5.50: valor medio rami utili i-MIMO DAS tridimensionale  
4 rami al variare di  $\beta$**

In figura 5.50 viene mostrato il grafico riguardante il valor medio di rami utili, nelle due condizioni di propagazione, che sono discriminate

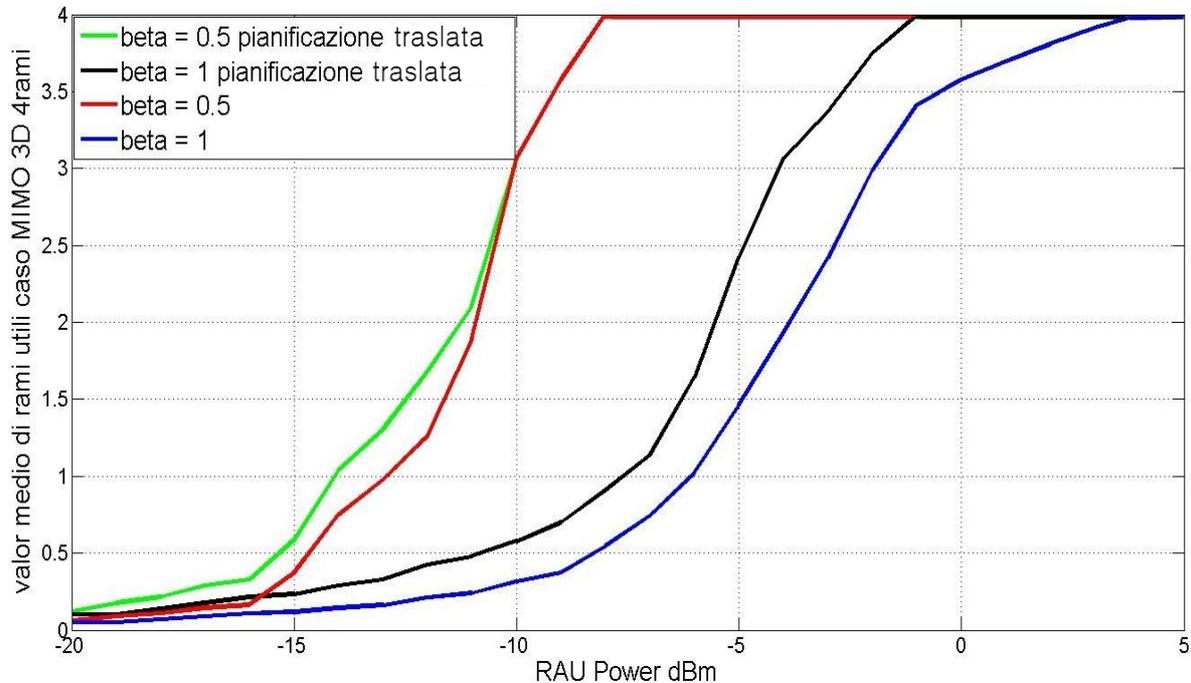
dal valore di  $\beta$ . La curva calcolata per  $\beta = 0.5$  raggiunge 4 rami utili ad una potenza di trasmissione delle RAU di -8 dBm circa. Il valore massimo di rami utilizzabile per la curva calcolata con  $\beta = 1$  è raggiunto con una potenza in trasmissione delle RAU di circa -1 dBm. In figura 5.51 è mostrato il grafico del valor medio di rami inutili riferiti alla pianificazione tridimensionale traslata i-MIMO DAS 4 rami. Tale grafico mostra ciò che abbiamo già visto per il valor medio di rami utili, ma considerando il valor medio di rami inutili che ci fa capire meglio quanti rami del sistema non apportano contributo valido alla trasmissione.



**Figura 5.51: valor medio rami inutili i-MIMO DAS tridimensionale 4 rami al variare di  $\beta$**

Entrambi i grafici sul valor medio di rami possono essere utilizzati per estrapolare le specifiche di progetto, come la potenza a cui devono trasmettere le RAU per ottenere la copertura ottimale. Abbiamo già

dimostrato che la pianificazione tridimensionale traslata è quella che fornisce migliori prestazioni, ora mettiamo a confronto il valor medio di rami utili per la pianificazione tridimensionale traslata con la pianificazione in cui non sono applicate traslazioni dei piani.



**Figura 5.51: confronto valor medio rami utili pianificazione i-DAS MIMO tridimensionale 4 rami traslata e non al variare di  $\beta$**

Il confronto appena descritto è mostrato in figura 5.51 dove sono state analizzate le curve calcolate per  $\beta = 0.5$  e  $\beta = 1$  nelle due diverse pianificazioni. Per le curve con  $\beta = 0.5$  a potenze di trasmissione basse, si ha che il valor medio di rami utili della pianificazione tridimensionale traslata risulta leggermente migliore del caso con i piani non traslati. Da  $-10$  dBm di potenza trasmessa in poi le curve con  $\beta = 0.5$  sono sovrapposte. Questo comportamento ci conferma che la traslazione dei piani non è sufficiente a migliorare la copertura rispetto al caso non traslato. Le curve calcolate per  $\beta = 1$  mostrano un

netto miglioramento del caso pianificato in maniera traslata. Infatti il valor medio di rami utili risulta essere migliore per tutte le potenze utilizzate nel testare la pianificazione. Possiamo quindi dire che l'utilizzo della traslazione dei piani delle antenne di un edificio è ancor più vantaggiosa nel caso in cui l'attenuazione  $\beta$  del modello di propagazione è maggiore.

## Conclusioni

La tecnica Interleaved MIMO DAS studiata in questa tesi consente di avere sia i vantaggi tradizionali dei sistemi DAS, cioè una maggior copertura in ambiente indoor, sia di sfruttare al meglio i vantaggi offerti dalle tecniche di trasmissione MIMO. Inoltre, la tecnica “interleaved” consente di avere prestazioni simili a quelle dei sistemi co-located MIMO DAS ma ad un costo notevolmente inferiore. La tesi è stata incentrata principalmente sulle strategie di planning per sistemi i-MIMO DAS, considerando coperture lineari, 2D e 3D. In base alle considerazioni fatte si è potuto vedere che nelle pianificazioni bidimensionali in cui il cluster non è quadrato, rappresentati dai casi 2 e 8 rami, la disposizione traslata da vantaggi abbastanza consistenti alla copertura, soprattutto nel caso del sistema a 8 rami. Lo studio fatto sulla pianificazione tridimensionale ha portato alla conferma che disporre in maniera traslata i piani delle antenne di un edificio genera vantaggi in termini di copertura e di prestazioni. La pianificazione è stata effettuata utilizzando formule empiriche per la propagazione in ambiente indoor, e basandosi su semplici criteri, ricavati da simulazioni di sistema LTE. Per la maggior parte delle simulazioni fatte abbiamo avuto la conferma che se il valore di potenza di un ramo del sistema considerato è inferiore ad una certa  $P_{min} \geq N+k$  con  $N=-100 \text{ dBm}$  il ramo può essere ritenuto inutile ai fini del throughput. La variabile  $k$  è un valore di soglia espresso in potenza. Tale valore è determinabile per i sistemi i-MIMO DAS 2 e 4 rami, mentre per sistemi di complessità maggiore non è facilmente determinabile. Le valutazioni fatte nella tesi sono state effettuate

fissando la soglia di funzionamento  $k$  di un ramo a 15 dB, dopodiché ci si è posti di determinare a quale potenza le RAU devono trasmettere per poter sfruttare al meglio il sistema considerato. Il valore della potenza in trasmissione da attribuire alle antenne remote, rappresenta il parametro che il progettista deve calibrare per poter garantire una copertura ottimale dell'area da pianificare. Nel caso non ci sia la possibilità di modificare la potenza in trasmissione, abbiamo pensato di fornire un programma che da la possibilità di impostare la potenza di trasmissione delle RAU per poter valutare la distanza come parametro da definire. Sono stati realizzati per il caso lineare e per il quello bidimensionale 4 rami, i programmi che calcolano la distanza come parametro da individuare. Concludendo possiamo dire che lo studio fatto sulla pianificazione di sistemi i-MIMO DAS può dare un contributo consistente alla progettazione e installazione di questi sistemi nelle attuali e future applicazioni di estensione della copertura wireless in ambienti indoor.

## Riferimenti

[1] *LTE and the Evolution to 4G Wireless Design and Measurement Challenges*. Edit by Moray Rumney. Agilent Technology.

[2] Lesson 12<sup>th</sup> “Radio mobile channel I”, lesson 13<sup>th</sup> “Radio mobile channel II”, and lesson 14<sup>th</sup> “MIMO channel” of “Propagazione e pianificazione nei sistemi d’area LM” of master’s degree in electronic engineering, university of Bologna, based in Cesena; Prof. Ing. Vittorio Degli Esposti.

[3] *seminario LTE & LTE advanced edit by Enrico Tarantino based in Cesena*

[4] *Analysis of the Performance of LTE Systems in an Interleaved F-DAS MIMO Indoor Environment edit by E. M. Vitucci\*, L. Tarlazzi+, P. Faccin+, and V. Degli-Esposti\**

*University of Bologna, Dipartimento di Elettronica, Informatica e Sistemistica (DEIS) Villa Griffone, 40037 Pontecchio Marconi, Bologna, Italy*

[5] *Vienna LTE Simulators Link Level Simulator License Agreement*  
Institute of Telecommunications Vienna University of Technology,  
Austria

[6] *Channel Models Tutorial1 V1.0 February 21, 2007, ITU-R CHANNEL MODEL FOR INDOOR OFFICE*

[7] *E. M. Vitucci, L. Tarlazzi, F. Fuschini, P. Faccin, and V. Degli-Esposti* , “*Interleaved-MIMO DAS for Indoor radio coverage: concept and performance assessment,*” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, submitted.